

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



Disertační práce

Úprava geometrie vtokového systému pro PC/ABS

2015

Ing. Jiří Technik

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření
Tváření plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Úprava geometrie vtokového systému pro PC/ABS

Geometry modification of cold runner system for PC/ABS

Ing. Jiří Technik

Školitel: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Vedoucí katedry: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 146

Počet tabulek: 16

Počet příloh: 2

Počet obrázků: 192

Anotace

Téma práce:

Úprava geometrie vtokového systému pro PC/ABS

Předkládaná disertační práce se zabývá úpravou geometrie vtokového systému pro polymerní materiál PC/ABS. Tento materiál vykazuje špatnou tekutost a jeho vnitřní struktura je citlivá na smykové namáhání a tepelnou degradaci. V disertační práci je navržena a realizována modifikace filmového vtoku zlepšující tok taveniny ústím vtoku. Práce se zabývá tokem Obecně Newtonské a viskoelastické kapaliny kontrakcí kanálu při smykových rychlostech odpovídající technologii vstřikování. V praktickém experimentu se práce zaměřuje na tlakové poměry při plnění a nestabilitu toku. Porovnání filmového vtoku s modifikovaným vtokem umožňuje pro tento účel vyrobená vstřikovací forma a simulace toku taveniny při izotermických i ne-izotermických podmínkách.

Klíčová slova: úprava geometrie vtoku, Obecně Newtonská kapalina, viskoelastická kapalina, tok kontrakcí

Abstract

Thesis topic:

Geometry modification of cold runner system for PC/ABS

Submitted doctoral thesis aims to modify gate geometry of cold runner system for polymeric material PC/ABS. The polymeric material has low flow index and its inner structure is sensitive to shearing and high temperature. Developed geometric modification of film gate improves melt flow through gate contraction in this work. The work is focusing an effect of the contraction ratio upon Generalized Newtonian and viscoelastic fluid with injection molding flow conditions. Results from numerical calculations are discussed with experimental measuring of melt pressure ratio and flow instability. Custom made tool allows independent part filling by new gate geometry and film gate and melt pressure measuring between gate contractions.

Keywords: cold runner geometry modification, Generalized Newtonian flow, viscoelastic flow, flow through a sudden contraction

„Rád bych poděkoval panu prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi, vedoucímu disertační práce, za vedení, cenné připomínky a věnovaný čas.

Rovněž bych rád poděkoval kolegům, přátelům a rodině za pomoc při získání potřebných informací a vstřícnost“.



OBSAH

ZKRATKY A ZNAČENÍ	8
1 ÚVOD	10
1.1 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	14
2 STUDENÉ VTOKOVÉ SOUSTAVY	15
2.1 NAVRHOVÁNÍ VTOKU A DIMENZOVÁNÍ VTOKOVÉHO ÚSTÍ.....	15
2.2 KONSTRUKČNÍ VARIANTY STUDENÝCH VTOKOVÝCH SOUSTAV	16
KUŽELOVÝ VTOK	17
BODOVÝ VTOK.....	18
TUNELOVÝ VTOK.....	18
BANÁNOVÝ VTOK	19
SKOKOVÝ VTOK „JUMP GATE“	20
ŠTĚRBINOVÝ VTOK	20
FILMOVÝ VTOK	21
ROZŠÍŘENÝ TUNELOVÝ A BANÁNOVÝ VTOK „CHISEL GATE“	22
DEŠTNÍKOVÝ VTOK	22
PRSTENCOVÝ VTOK.....	23
TALÍŘOVÝ VTOK	23
ROZVÁDĚCÍ KANÁLY	24
3 POLYMERNÍ MATERIÁLY JMENOVANÉ V DISERTAČNÍ PRÁCI.....	24
PC/ABS	24
PC	25
LDPE	25
LLDPE	25
HDPE.....	25
PP.....	25
PVC	25
4 NÁVRH MODIFIKOVANÉ GEOMETRIE VTOKU	26
5 NEWTONSKÉ KAPALINY.....	28
6 NE-NEWTONSKÉ KAPALINY A TAVENINY POLYMERŮ	30
6.1 MECHANISMUS LAMINÁRNÍHO TOKU POLYMERNÍCH TAVENIN.....	31
6.2 ORIENTACE MAKROMOLEKUL PŘI LAMINÁRNÍM TOKU POLYMERNÍCH TAVENIN	32
6.3 VIZKOZITA POLYMERNÍCH TAVENIN.....	33
6.3.1 SMYKOVÁ VIZKOZITA	33
6.3.2 TAHOVÁ (ELONGAČNÍ) VIZKOZITA	34
6.4 TEPELNÁ VODIVOST POLYMERNÍCH TAVENIN	34



6.5	NAPĚTÍ PŘI LAMINÁRNÍM TOKU POLYMERNÍCH TAVENIN.....	37
6.5.1	TENSOR NAPĚTÍ.....	38
6.5.1.1	TENSOR NAPĚTÍ SE ZANEDBÁNÍM VISKOELASTICKÉ SLOŽKY	39
6.5.1.2	TENSOR NAPĚTÍ PRO VISKOELASTICKOU KAPALINU.....	39
6.5.1.3	ROZDÍL NORMÁLOVÝCH NAPĚTÍ.....	40
6.5.1.4	MEZNÍ HODNOTY NAPĚTÍ A SMYKOVÉ RYCHLOSTI V POVRCHOVÉ VRSTVĚ	41
6.5.2	MĚŘENÍ SMYKOVÉHO NAPĚTÍ POLYMERNÍCH TAVENIN	42
7	MATEMATICKÝ POPIS LAMINÁRNÍHO TOKU A ODVODU TEPLA V DUTINĚ FORMY	44
7.1	ZÁKON ZACHOVÁNÍ OBJEMU.....	44
7.2	ZÁKON ZACHOVÁNÍ HYBNOSTI	45
7.3	PRVNÍ TERMODYNAMICKÁ VĚTA	46
8	PODOBNOSTNÍ ČÍSLA VYUŽÍVANÁ PŘI TOKU VISKOELASTICKÝCH KAPALIN.....	48
9	MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VISKOELASTICKÝCH KAPALIN.....	51
9.1	PROGRAMY VYUŽÍVANÉ PRO PRŮMYSLOVÉ POUŽITÍ PŘI VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ.....	52
9.2	MATEMATICKÉ MODELY NAHRAZUJÍCÍ TOKOVÉ KŘIVKY A VISKOELASTICKÉ CHOVÁNÍ.....	54
9.2.1	OBECNÉ NEWTONSKÉ KAPALINY (GENERALIZED NEWTONIAN FLUIDS)	54
9.2.2	MODELY VISKOELASTICKÉHO CHOVÁNÍ ROZTOKŮ A TAVENIN POLYMERŮ	56
9.2.3	MODELY ZOHLEDŇUJÍCÍ VNITŘNÍ STRUKTURU MATERIÁLU.....	61
9.3	MATEMATICKÉ MODELY NAHRAZUJÍCÍ TERMODYNAMICKÉ VZTAHY	61
10	NUMERICKÝ VÝPOČET TOKU.....	62
10.1	TEPELNÁ VÝMĚNA.....	63
	SIMULACE	64
	ZKOUŠKA DOBY PŮSOBENÍ DOTLAKU.....	69
10.2	SMYKOVÁ RYCHLOST A VISKOZITA.....	73
	DISKUZE VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA TOKOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	76
10.3	VÝPOČET CELKOVÉHO TENSORU NAPĚTÍ T VISKOELASTICKÉ KAPALINY	78
10.3.1	URČENÍ MÍRY VISKOELASTICITY V OBLASTI ÚSTÍ VTOKU	78
10.3.2	TENSOR NAPĚTÍ ČISTĚ VISKÓZNÍHO TOKU T	81
10.3.2.1	NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ ČISTĚ VISKÓZNÍHO TENSORU	82
	ROZBOR SLOŽKY T_{11}	82
	ROZBOR SLOŽKY T_{22}	84
	NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ PODÉL PROUDNICE.....	84
10.3.2.2	SMYKOVÉ NAPĚTÍ ČISTĚ VISKÓZNÍHO TENSORU.....	87
	ROZBOR SLOŽKY T_{12}	87
	SMYKOVÉ NAPĚTÍ PODÉL PROUDNICE - EIGENVALUE	88
	DISKUZE VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA NAPĚTÍ ČISTĚ VISKÓZNÍHO TOKU.....	90
10.3.3	TENSOR NAPĚTÍ VISKOELASTICKÉHO TOKU T_1	91



10.3.3.1	NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ VISKOELASTICKÉHO TENSORU.....	93
	ROZBOR VISKOELASTICKÉ SLOŽKY T_{11}	93
	ROZBOR VISKOELASTICKÉ SLOŽKY T_{22}	94
	NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ PODÉL PROUDNICE.....	95
10.3.3.2	SMYKOVÉ NAPĚTÍ VISKOELASTICKÉHO TENSORU	97
	ROZBOR VISKOELASTICKÉ SLOŽKY T_{12}	98
	SMYKOVÉ NAPĚTÍ PODÉL PROUDNICE - EIGENVALUE	98
	DISKUZE VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA NAPĚTÍ VISKOELASTICKÉHO TOKU	102
10.4	CELKOVÉ NAPĚTÍ (TLAK) V TAVENINĚ	102
11	MĚŘENÍ NĚKTERÝCH STAVOVÝCH VELIČIN.....	104
11.1	KONSTRUKCE NÁSTROJE.....	105
11.2	MĚŘENÍ TLAKU V DUTINĚ FORMY	107
11.2.1	PRŮBĚH TLAKU V ZÁVISLOSTI NA ČASE.....	110
	MĚŘENÍ POMOCÍ TLAKOVÝCH ČIDEL	110
	SIMULACE	110
	DISKUZE VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA TLAKOVÝCH ZTRÁT	111
11.2.2	PRŮBĚH TLAKU V ZÁVISLOSTI NA VSTŘIKOVACÍ RYCHLOSTI	112
	DISKUZE VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA TLAKU PŘI RŮZNÝCH VSTŘIKOVACÍCH RYCHLOSTECH.....	117
11.2.3	PRŮBĚH POVRCHOVÉ TEPLoty PŘI ROZDÍLNÝCH VSTŘIKOVACÍCH RYCHLOSTECH....	117
	DISKUZE VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA POVRCHOVÉ TEPLoty.....	119
12	NESTABILITA VISKOELASTICKÉHO TOKU.....	119
	DISKUZE VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA NESTABILITY	120
13	DISKUZE VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	122
13.1	PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE.....	123
14	ZÁVĚR.....	125
15	DOPORUČENÉ POKRAČOVÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	126
	LITERATURA.....	128
	PUBLIKAČNÍ ČINNOST	134
	SEZNAM PŘÍLOH	136
	PŘÍLOHA A - VÝKRESY MODIFIKOVANÉ GEOMETRIE VTOKU	137
	PŘÍLOHA B - VÝKRESY VSTŘIKOVACÍ FORMY	140



Zkratky a značení

Tab. 1: Seznam zkratk a značení

Zkratka	Jednotka	Význam
t	s	Čas
λ	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	koeficient teplotní vodivosti
T_M, T_i	$^{\circ}\text{C}$	teplota taveniny
T_W, T_f	$^{\circ}\text{C}$	teplota formy
τ^*	Pa	kritické napětí
η	Pa.s	kinematická viskozita
μ	Pa.s	dynamická viskozita
ν	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita
$\dot{\gamma}$	s^{-1}	smyková rychlost
S_R	mm^2	průřez rozváděcího kanálu
F	N	Síla
τ	Pa	smykové napětí
S	m^2	plocha vrstvy
ρ	g/cm^3	hustota
λ_r	s	čas relaxace
B	Pa.s	konstanta Arrheniusova modelu
R	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	universální plynová konstanta
$E\eta$	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	aktivační energie viskózního toku
Mw	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	molární hmotnost
p	Pa	Tlak
$\dot{\epsilon}$	s^{-1}	rychlost dloužení
η_k	Pa.s	kontribuční viskozita
λ_k	s	kontribuční čas relaxace
u	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost toku
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
σ	Pa	normálové napětí
Cp	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita při stálém tlaku
Q	J	Teplo
k	$\text{Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	koeficient vedení tepla
α_k	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	koeficient prostupu tepla
T	Pa	tensor napětí
D		deformační tensor
$N_{1,2}$	Pa	rozdíl normálových napětí
x	mm	délka kontrakce
T_{11}	Pa	složka v ose x tensoru napětí ve směru proudnice
T_{22}	Pa	složka v ose y tensoru napětí kolmo na směr proudnice
νT_V	Pa	normálové napětí ve směru toku
T_{12}	Pa	smykové napětí v souřadném systému xy
Eigenv	Pa	smykové napětí podél toku
$\frac{dv}{dx}$		gradient rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu
VS		vtokový systém
HR		horký rozvod
PC		Polycarbonate
ABS		Acrylonitrile-butadiene-styrene
PE		Polyethylene
HDPE		High density polyethylene
LDPE		Low density polyethylene
LLDPE		Linear low-density polyethylene



Zkratka	Jednotka	Význam
PVC		Polyvinyl chloride
PP		Polypropylene
PMMA		Poly (methyl methacrylate)
POM		Polyoxymethylene
PA		Polyamide
PET		Polyethylene terephthalate
PVC		Polyvinyl chloride
TPE		Thermoplastic elastomers
TPU		Thermoplastic polyurethane
PS		Polystyrene
m,n		index konzistence (index m je spojen s teplotou)
n		power law index
dt		přírůstek času
dx		přírůstek dráhy
k_n		koeficient vlivu násobnosti
n		počet rozváděcích kanálů
A		empirická konstanta závisující na materiálu a teplotě
Tr		Troutnův poměr
ε		poměrné prodloužení
∇		del operátor
Wi		Weissenbergovo číslo
ψ_1		koeficient hlavního napětí
Re		Reynoldsovo číslo
Nu		Nusseltovo číslo
PTT		Phan-Thien-Tanner model
ξ		materiálová konstanta PTT modelu
ε		materiálová konstanta PTT modelu
α		materiálová konstanta Giesekus modelu
GNF		Generalized Newtonian fluid
Mod		modifikovaný vtok
Film		filmový vtok
μ		aritmetický průměr
u_a		nejistota typu A
u_{ak}		rozšířená nejistota měření
u_b		nejistota typu B
u_c		nejistota typu C
U		standartní rozšířená nejistota

1 Úvod

Vstřikování termoplastů je jeden z nejrozšířenějších výrobních procesů zpracování plastů. Zpracování probíhá při teplotách přesahujících teplotu tání a smykových rychlostech nad 1000 s^{-1} .

V komoře vstřikovacího lisu se materiál v kontaktu se šnekem taví a promíchává. Až cca 70 % tepla je způsobené třením mezi šnekem-materiálem-komorou a zbytek připadá na ohřev komory topnými pásmy. Při tomto procesu se postupně roztavující se materiál dostává před šnek a v podobě taveniny je připraven pro vstřik do dutiny formy. Pomocí šneku s uzavíratelnou špičkou je materiál následně vstříknut do dutiny formy. Tento proces trvá řádově pouze několik sekund a na materiál působí velké teplotní a mechanické namáhání. Teoreticky lze vstřikování taveniny popsat jako viskoelastický tok v oblasti vysokých smykových rychlostí s ne-izotermickým dějem.

Celkově je proces vstřikování rozdělen na několik fází, které ovlivňují kvalitu výsledného výrobku:

- vstřik + počátek chlazení
- dotlak + chlazení
- dodatečné chlazení + dávkování

Chlazení a s ním spojený pokles teploty taveniny začíná již s prvním kontaktem taveniny s dutinou formy, která má nižší teplotu než tavenina a pokračuje v průběhu dotlaku až do zamrznutí taveniny a poklesu teploty na teplotu vhodnou k vyjmutí vylisku. Dotlak probíhá při malých rychlostech a kompenzuje (ovlivňuje) smrštění materiálu.

Vstřikovací forma je konstruována v závislosti na materiálu výrobku, jeho tvaru, počtu vyráběných kusů, typu vstřikovacího lisu, hospodárnosti atd. Základními částmi každé formy je dutina formy, která má tvar výrobku zvětšeného o smrštění materiálu. Dutina formy se zpravidla dělí na tvárnici (pohledová část dílu) a tvárník. Tvárnice je u vzhledových dílů často leštěná nebo dezénovaná. Každá vstřikovací forma musí mít chlazení a vtokový systém. Z funkčních částí forma může obsahovat odformovací a vyhazovací systém, centrování, vedení, odvzdušnění, přípojky médií, desky, šrouby, vložky, atd.

Vtoková soustava technologie vstřikování výrazně ovlivňuje kvalitu hotového dílu a zároveň i ekonomiku vstřikovacího procesu. Vtoková soustava zajišťuje dopravu taveniny z komory vstřikovací jednotky do dutiny formy. Její složitost je dána tvarem výrobku, materiálem výrobku, požadovanou kvalitou výrobku a ekonomickou stránkou výroby. Obecně se dělí vtokový systém na studený a horký. Horké vtoky jsou ekonomicky rentabilní až u velkého počtu vyráběných kusů za rok nebo drahých materiálů (TPU, TPS, PEEK, PC atd.). Cena za jednu trysku se pohybuje kolem 1-4 tis € podle druhu trysky a výrobce (v r. 2014). V běžné praxi se dosahuje desetitisíců zdvihů za rok a HR má tak velké využití. Studené kanály lze v některých případech vrátit do procesu nebo využít k jiným účelům a snížit náklady za materiál. V automobilovém nebo leteckém průmyslu však k recyklacím dochází zatím pouze výjimečně. Před návrhem vtokového systému by tak mělo dojít ke kalkulaci spotřebovaného materiálu a ceny za horký rozvod. Obě soustavy mají své výhody a nevýhody, často se obě soustavy kombinují a využívá se tak jejich výhod.

Výhodou horkých rozvodů je 99 % využití materiálu bez odpadu, nižší tlakové ztráty, kratší vstřikovací cyklus (kratší doba chlazení, přímé plnění dutiny formy), menší otevření nástroje ve srovnání s třideskovým systémem se studenou vtokovou soustavou, možnost kaskádového plnění. Jejich nevýhodou je vysoká pořizovací cena, vyšší nároky na údržbu a provoz (kanály horkého rozvodu, izolace, těsnění, elektrická soustava, čidla, výměna materiálu při výrobě, uvedení nástroje do provozu, atd.), zvětšení výšky formy.

Ohřev rozváděcích kanálů trysek se dělí na:

- vnitřní ohřev
- vnější ohřev
- izolované vtokové ústí (živé vtoky)

Trysky horkých rozvodů mohou být:

- otevřené
- otevřené s torpédem

- uzavíratelné (řešeno hydraulicky nebo pneumaticky ovládanou jehlou).

Konce otevřených trysek mají různá zakončení v závislosti na použitém vstřikovaném materiálu a požadavcích na kvalitu oddělení. Tyto trysky se např. nehodí pro termoplastické elastomery nebo materiály s vysokým indexem toku.

Konstrukce otevřených trysek se dělí na:

- se šroubovací špičkou
- s předkomůrkou
- s bočním vyústěním
- mikrosystémy s několika vtoky na 100 mm^2

Konstrukce uzavíratelných systémů se dělí na:

- jehly s válcovou špičkou
- jehly s kónickou špičkou
- trysky se šroubovací špičkou
- trysky s předkomůrkou

Studených vtokových soustav je mnoho druhů, lišících se způsobem oddělení od dílu a především svým tvarem. U studených vtokových soustav, dále jen VS, dochází k zamrznutí plastu během procesu vstřikování a po ukončení jsou spolu s dílem vyhozeny z formy. Správně navržená VS zamrzá jako poslední. Svoji funkci tak plní, dokud není díl kompletně zamrznutý nebo dokud nedošlo k zamrznutí ústí vtoku, který je zpravidla nejmenší částí. Příliš naddimenzovaná VS prodražuje výrobu a může zvýšit požadavky na rozměry nástroje, uzavírací sílu, intenzitu chlazení nástroje, dobu dotlaku nebo zhoršit výslednou kvalitu výrobku. V dnešní době stále používanější simulační programy plnění pomáhají správně navrhnout nebo optimalizovat VS, jejich cena je však s ohledem na některým aplikacím příliš vysoká. Proto lze často vystačit pouze s empirickými výpočty rozměrů VS resp. zkušenostmi. Studené VS umožňují variabilní umístění ústí vtoku na díle s různými tvary ústí vtoku. V případě potřeby lze ústí vtoku umístit do téměř jakéhokoliv místa na díle, to z konstrukčních důvodů u horkých vtoků provést nelze. Mezi



další výhody studených VS patří bezúdržbovost, jednoduchá výroba, nízká výrobní cena a malé rozměry. Jejich nevýhodou jsou vtokové zbytky, které nejdou dále zpracovat a v některých případech neumožňují automatické oddělení vtokového zbytku od dílu. To u velkých VS a velkých výrobních sérií prodražuje výrobu a zvyšuje ekologickou zátěž. Studené vtokové zbytky se často drtí a vrací se zpět do procesu jako vratný materiál, což dělá ze studených vtokových soustav stále ekonomicky výhodnou variantu. Materiály jako termoplastické elastomery se dále nezpracovávají, protože při dalším zpracování již podléhají degradaci.

Hledáním nových, výhodnějších vtokových soustav pro různé typy plastů a stále technicky složitější výlisky se zabývá mnoho výrobců materiálů nebo normativů forem. Snahy o vyšší jakost výlisků bez studených spojů, vzduchových šmouh, vzduchových bublin, vnitřního pnutí, atd. vedou ke speciálním konstrukcím studených vstřikovacích soustav.

1.1 Cíle disertační práce

Disertační práce si klade za hlavní cíl navrhnout a numericky a prakticky ověřit novou geometrii vtoku pro polymerní materiál PC/ABS. Zároveň aplikovatelnou pro podobné materiály citlivé na smykové namáhání.

K naplnění hlavního cíle je disertační práce rozdělena na několik dílčích cílů.

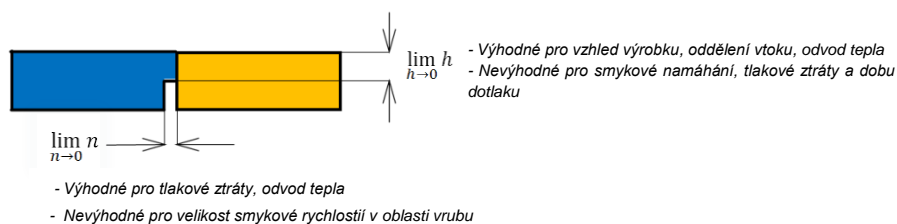
- Rešerše odborné a patentové literatury vtokových soustav používaných v průmyslové praxi. Rešerše numerického modelování toku viskoelastických kapalin. Tato část je zaměřena na tok kontrakcí, tok mezi rovnoběžnými deskami a volný výtok do prostoru. Rešerše výpočetních modelů viskoelastického chování.
- Na základě rešerše provedení teoretického rozboru oblasti ústí vtoku pro čistě viskózní tok se závislostí viskozity na smykové rychlosti.
- Teoretický rozbor tensoru napětí oblasti ústí vtoku pro čistě viskózní a viskoelastický tok podle PTT modelu. Tato část by měla vědeckým přístupem zvýšit stav poznání tensoru napětí v kontrakci ústí vtoku pro čistě viskózní a viskoelastický tok v oblastech smykové rychlosti pro technologii vstřikování.
- Návrh nové geometrie vtoku pro polymery citlivé na smykové namáhání. Tato část se týká numerického výpočtu toku a diskuze tokových vlastností nově navrženého vtoku s použitím izotermického a neizotermického děje.
- Návrh vstřikovací formy pro vstřikování zkušebních tělísek s nezávislým plněním filmovým nebo nově navrženým vtokem. Konstrukce formy musí umožnit měření tlaků a povrchové teploty v dutině formy. Filmový vtok bude plnit funkci etalonu.
- Měření vybraných stavových veličin v dutině formy před a za ústím vtoku. V této části bude měřen průběh tlaků a povrchové teploty v dutině formy s vizuálním porovnáním zkušebních tělísek z hlediska stability toku. Výsledky budou diskutovány s výsledky získanými z modelování toku.

2 Studené vtokové soustavy

2.1 Navrhování vtoku a dimenzování vtokového ústí

Vtok je část VS mezi rozváděcím kanálem a ústím vtoku, jeho tvar by měl umožnit snadné plnění dutiny formy, neměl by negativně ovlivnit vlastnosti proudící taveniny a zároveň by měl mít co nejmenší objem.

Nejkritičtější částí většiny vtoků je ústí vtoku, oblast kde se spojuje vtok s dutinou formy a dochází k náhlé kontrakci kanálu. Vtok by mělo jít snadno oddělit, proto mívá ústí vtoku nejmenší průřez, který definuje místo odtržení. Z hlediska výrobku se požaduje mít co nejmenší počet a velikost viditelných stop po vtoku, pokud pomineme kvalitativní rizika na díle. Na druhou stranu z reologického hlediska je výhodné mít co největší průřez tak, aby vtok měl co nejmenší hydraulické ztráty a docházelo k co nejmenšímu namáhání taveniny při tečení.



Obr. 1: Vhodnost vtokového ústí

Při navrhování geometrie vtoku je nutné nejdříve specifikovat přesné určení vtoku a požadavky na něj. V praxi je často nutné zohlednit více vlastností vtoku a ve skutečnosti tak vždy musí dojít ke kompromisu. Malé vtokové ústí umožní snadné odtržení a nepatrnou vtokovou stopu, ale povede k nárůstu tlakové ztráty, smykové rychlosti, napětí a pravděpodobně k nedostatečné kompenzaci smrštění vlivem brzkého zamrznutí vtoku. Naopak příliš velké vtokové ústí může, kromě obtížného opracování a viditelné stopy, způsobit propad v oblasti ústí vtoku vlivem distribuce zbytkového tepla do dílu a vtažení materiálu vlivem dosmrštění stále tekutého materiálu vtoku.

Každý plněný materiál má specifické požadavky na dimenzování ústí vtoku. Semikrystalické materiály jako PP musejí mít dimenzovaný vtok především pro fázi dotlaku. Během chladnutí dochází po celou dobu ke krystalizaci a ubývající materiál je nutné více kompenzovat. V oblasti ústí vtoku již nevzniká žádné třecí teplo a ústí vtoku chladne podobně jako materiál

v dutině formy. Abychom mohli správně kompenzovat celý objem výlisku, mělo by vtokové ústí zamrznout jako poslední. To znamená mít vtokové ústí dostatečně dimenzované převážně pro fázi dotlaku. Situace je rozdílná pro amorfní plasty, např. s karbonovou, akrylátovou nebo styrenovou strukturou řetězce. U těchto materiálů dochází při vysoké smykové rychlosti k namáhání řetězců a může dojít i k porušení řetězce. Vzhledem k tomu, že tyto materiály mají většinou nízký index toku (PC), musí být ústí vtoku dimenzované natolik, aby nedošlo k dosažení maximálního vstřikovacího tlaku stroje. Fáze dotlaku je pro tyto materiály krátká. Ústí vtoku je dimenzované především pro fázi vstřiku a zohledňuje míru smykové rychlosti a vstřikovacího tlaku. Při nedodržení optimálního rozměru ústí vtoku může vzniknout tzv. „jetting“ nebo v případě nadměrného ústí vtoku tzv. „lunker“. Pro materiály jako POM, LDPE, HDPE, PVC je potřeba dimenzovat ústí vtoku jak pro fázi vstřiku, tak pro fázi dotlaku. Tyto materiály jsou citlivé na smykovou rychlost a víření, zároveň jako semikrystalické plasty vyžadují delší dobu kompenzace smrštění. Ústí vtoku by mělo být co možná největší, ale musíme počítat s propadem u vtoku. Velikost ústí vtoku nelze zobecnit, vždy se musí přihlídnout k druhu materiálu, vtoku, tvaru dílu a předpokládanému technologickému nastavení. Často se dělá ústí vtoku o něco menší a při další optimalizační smyčce formy se nechá zvětšit na potřebný rozměr.

2.2 Konstrukční varianty studených vtokových soustav

Existuje mnoho variant vtoků, které se v principu liší svojí použitelností pro určitý tvar dílu, způsobem odformování a použitelností pro daný materiál. Jde o vtoky, které nejsou nijak průmyslově chráněny.

Případné modifikace vtoků se dějí na úrovni změny jejich rozměrů nebo úpravě tvarové kontury a zabývají se tím především velcí výrobci polymerních granulátů (Dupont, Ticona, Bayer, BASF, Sabic, Dow, Borealis), kteří doporučují rozměry a typy vtoků pro své materiály, a výrobci normativů pro vstřikovací formy (i-mold, exaflow, DME, Hasco, Incoe, Synvative, Masterflow). Rozměry vtoku ovlivňují reologické podmínky vstřikovaného materiálu a konečný E modul již zatuhlého polymeru. Ten je důležitý při odformování některých tvarů vtoků. Většina dnešních inovací vtokových systémů je pro konkrétní materiál a konkrétní reologické podmínky (smyková

rychlost, teplota, viskozita materiálu). Takto byl v minulosti inovován tunelový vtok, kdy pouze posunutím geometrie kužele vznikl slepý prostor, ve kterém neproudí tavenina, a tento prostor po ztuhnutí plní funkci izolační vrstvy v těsné blízkosti ústí vtoku. Jsou tak zlepšeny podmínky při tečení materiálu v kritické části vtoku na základě obecně známých fyzikálně-chemických principů. Firma Borealis vyvinula tvar vtoku odstraňující tzv. tygr efekt u polypropylenu, což je vzhledová vada se střídavými pruhy tmavého a světlého odstínu. Firma Beaumont Technologies, inc. se zabývá balancováním vtokových systémů (kromě jiného) a vyvinula systém MeltFlipper®, který řeší vliv třecího tepla na povrchu vtokového kanálu při tečení taveniny, vznikajícího vlivem velkých rychlostí a nízkých teplot. Tento jev se vyskytuje u rozvětvených vtokových soustav, kdy vývin tepla při plnění a rozdělení kanálu způsobí nesymetrickou distribuci tepla uvnitř kanálu. To ovlivňuje rovnoměrnost plnění dutin i u jinak přirozeně vybalancovaných vtokových systémů. Existuje značné množství různých úprav forem pro vytvoření ideálních podmínek při plnění (především z USA), např. temperované ústí vtoku, pomocí šoupěte variabilně řízená velikost ústí vtoku, aplikace topných patron ve vtokovém systému, míchací spirály před vstupem taveniny do vtokového systému, atd.

Inovace (modifikace) vtokových systémů jsou nutné především při nestandardních podmínkách plnění, u materiálů vyžadujících speciální zacházení např. vlivem jejich tepelné degradace, náchylnosti k turbulentnímu proudění, citlivosti na smykové namáhání a jejich další aplikací u průmyslových výrobků s požadavkem na tvarovou stálost, dobré optické vlastnosti, jakost povrchu, neutrální zápach, atd. To v dnešní době, kdy přichází stále více výrobců s novými materiály na trh a kvalitativní požadavky na průmyslové výrobky se zvyšují, nabývá stále více na významu.⁷

Kuželový vtok

Kuželový vtok patří mezi nejjednodušší vtoky, kde vtok je tvořen přímo vtokovou vložkou nástroje. Vtok lze použít pouze pro jednonásobné nástroje a je umístěn v ose středících kroužků nástroje. Kuželový vtok by měl být vždy umístěn v nejtlustší části dílu. Průměr vtoku musí být větší, než je tloušťka

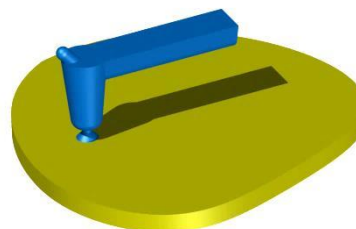
dílu, aby tavenina v kanálu ztuhla naposledy. Hodí se pro rotační nebo jinak symetrické díly.^{1 s. 159-160, 1}

Bodový vtok

Bodový vtok je umístěn ve směru osy středících kroužků. Je použitelný v tří-deskové konstrukci forem, celý vtok je zaformovaný v druhé pohyblivé desce. Ústí vtoku by mělo být dostatečně malé (v závislosti na materiálu), aby po utržení vtoku nebyla výrazná stopa. Toto ústí je obecně menší než 50 % tloušťky stěny dílu.^{1 s. 166, 1}



Obr. 2: Kuželový vtok

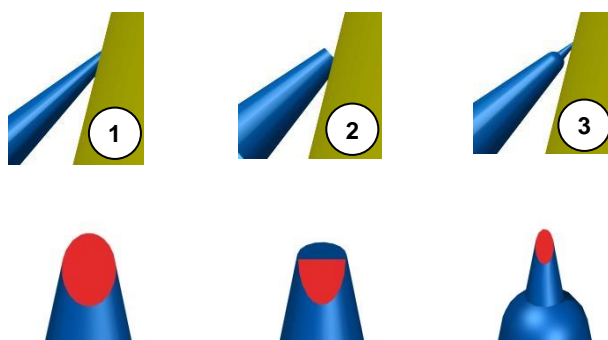


Obr. 3: Bodový vtok s přidržovačem vtoku

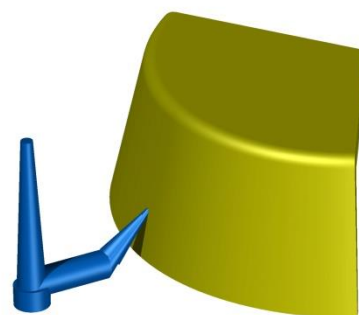
Tunelový vtok

Tunelový vtok má kuželový tvar s nejmenším koncem kužele v dutině formy umožňující snadné odformování vtoku. Vtok je navržen tak, aby při odformování došlo automaticky k oddělení od dílu. Během vyhazování je vtok oddělen a vytážen z formy. Běžně se používá ve dvou-deskovém provedení formy. Jeho výhodou je automatické odtržení ve studených soustavách vtoků. Průměr ústí vtoku by měl být mezi 30 % až 70 % tloušťky stěny a závisí především na druhu materiálu. Při vytahování z formy dochází k deformaci vtoku, vtok se tak více hodí pro pružné materiály. Velikost deformace vtoku při vyhazování lze ovlivnit úhlem svírající kužel a kanál vtoku, velikost úhlu se používá 20° až 50° (křehčí materiály budou mít menší úhel). K usnadnění deformace vtoku také dojde zvětšením průměru kořene vtoku. Větší kužel vtoku si déle udrží vyšší teplotu a vtok je při odformování pružnější. Tunelový vtok se vyskytuje ve třech variantách ústí vtoku. Různé varianty vtoku ovlivňují stopu vtoku po odtržení, smykovou rychlost a dobu zamrznutí.

Nejběžnějším typem vtoku je varianta 1, varianta 2 je méně běžná a ústí vtoku má tvar písmene D (obr. 5). Tato konstrukce může zlepšit fázi dotlaku, pokud je použit semikrystalický materiál nebo může snížit smykové tření v oblasti ústí vtoku. Při tečení materiálu dochází k zamrzání taveniny v blízkosti ústí a vzniká izolační vrstva prodlužující dobu zamrznutí ústí vtoku. Tato konstrukce může také redukovat stopu po odtržení. Nevýhodou tohoto návrhu je obtížnější vybalancování vtokové soustavy u vícenásobných forem. Varianta C spojuje výhody obou systémů, je však pracnější na výrobu. ^{1 s. 164-165, 1}



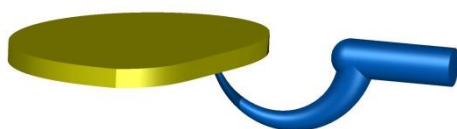
Obr. 4: Varianty ústí vtoku tunelového vtoku



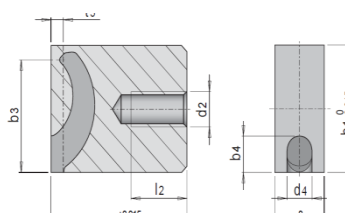
Obr. 5: Tunelový vtok, varianta č.1

Banánový vtok

Zahnutý tunelový nebo také banánový vtok je velmi podobný tunelovým vtokům. Umožňuje umístění ústí vtoku v místech, která nemohou být dosažena standardním tunelovým vtokem. Použití vtoku je omezené materiálem s nízkým modulem tažnosti, protože k odformování je nutná velká deformace. U amorfních materiálů se doporučuje použití kořene s velkým průměrem. Ten stejně jako u tunelového vtoku zajistí změknutí kanálu při odformování. K zaformování vtoku lze použít i komerčně vyráběné dělené vložky. ^{1 s. 165-166, 1}



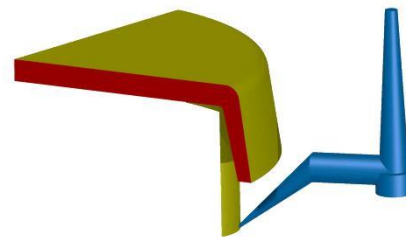
Obr. 7: Banánový vtok



Obr. 6: Vtoková vložka E1690 fy. Meusburger

Skokový vtok „Jump gate“

Skokový vtok je další varianta tunelového vtoku a může být použitý pro odstranění stopy ústí z pohledové strany dílu. Užívá se v případech, kde je kosmetický či funkční zájem mít vtok ve vnitřní části dílu. Princip plnění je podobný banánovému vtoku. Výběžek na díle je často použit výhradně za účelem plnění.



Obr. 8: Skokový vtok

Může být odstraněný ručně po vyhození nebo navržený tak, aby nezasahoval do normální funkce dílu. Jeho zaformování může být tvořeno vyhazovačem. Dimenzování ústí vtoku je stejné jako u tunelového vtoku. ^{1 s. 166, 1}

Štěrbínový vtok

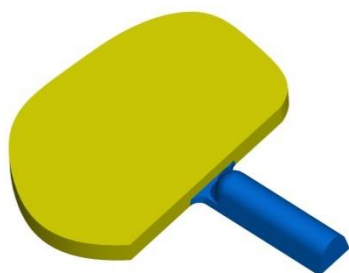
Tečení taveniny ústím vtoku je usměrněno proti stěně dílu. Tokem do stěny formy vznikne odolnost plnění proti jettingu. Nevýhodou je absence automatického odstranění vtoku.

Plochý vtok umožňuje jednoduché odformování a při použití křehkých materiálů může být díky vrubu automaticky oddělen.

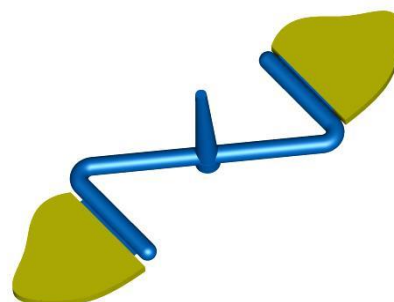


Obr. 9: Štěrbínový vtok s přesahem

Zlomení může být provedeno po odformování nebo ještě ve formě s nátláčnou hranou při dvoufázovém odformování. Velkou výhodou vtoku je zabránění vzniku jettingu, nevýhodou vtoku je obtížné vybalancování vtoku a v některých případech dochází k nevyrovnanému plnění. ^{1 s. 160, 167, 1, 3}



Obr. 10: Štěrbínový vtok s úpravou proti jettingu



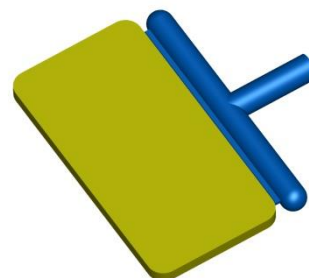
Obr. 11: Štěrbínový vtok s ústím do hrany výrobku

Filmový vtok

Filmový vtok je jeden z nejpoužívanějších vtoků, především u rozměrných plošných dílů. Průřez ústí vtoku má obdélníkový tvar s velkým poměrem šířka : výška s umístěním v dělicí rovině nástroje. K oddělení vtoku od dílu dochází až po vyjmutí dílu z formy manuálně nebo automaticky za pomoci průmyslového robota. Filmový vtok se postupně rozšiřuje do plochy z vtokového kanálu a končí v plněném výlisku (obr. 13). Před ústím vtoku může být část s malou tloušťkou stěny usnadňující odformování. Rozšířená část vtoku může mít na okraji zvětšenou tloušťku stěny umožňující rovnoměrné tečení taveniny filmovým vtokem. Tloušťka filmového vtoku se pohybuje mezi 50 % až 70 % tloušťky stěny dílu (místa umístění). U tenčích filmových vtoků hrozí zamrznutí ústí dříve, než dojde k úplné kompenzaci objemu ve fázi dotlaku. Šířka vtoku záleží na aplikaci a rozměru dílu, může se pohybovat od několika milimetrů po několik set milimetrů.

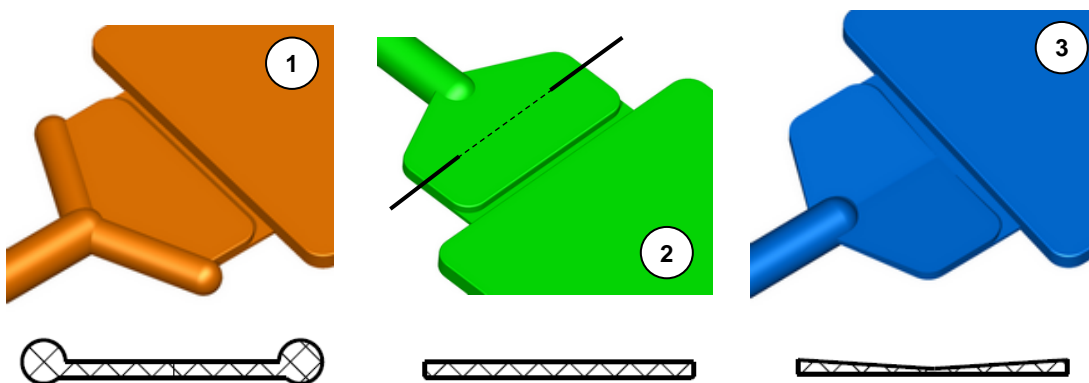


Obr. 13: Filmový vtok, film gate



Obr. 12: Filmový vtok s rozšířením, fan gate

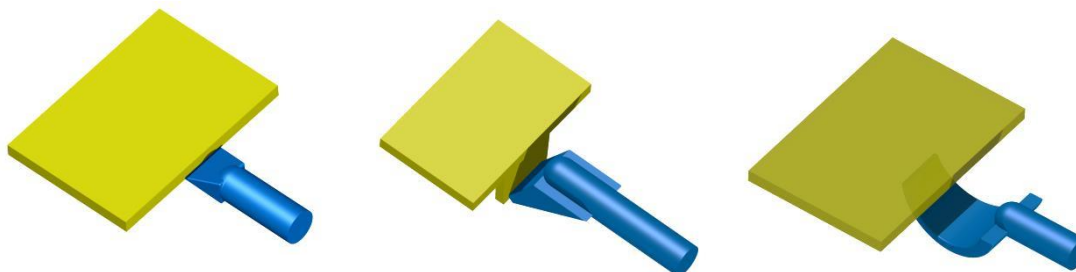
Druhá varianta filmového vtoku (obr. 12) využívá menšího prostoru a méně materiálu. Kanál podél ústí vtoku distribuuje taveninu a vyrovnává tak čelo taveniny do roviny. Nevýhodou ve srovnání s první variantou vtoku je menší předvídatelnost tečení taveniny. Při malé vstřikovací rychlosti může nastat i nevyrovnané plnění. Nedojde k úplnému zaplnění plnicího kanálu a tavenina začne plnit díl dříve. Vtok tedy nejlépe pracuje při vyšších vstřikovacích rychlostech, kdy je nevyvážený tok minimalizovaný. ^{1 s. 161-162, 1}



Obr. 14: Filmové vtoky s různými variantami rozšíření. Rozšíření tloušťky stěny na okraji napomáhá rovnoměrnému tečení zploštělou částí vtoku. Varianta 1 vyrovnává tok pomocí vyfrézovaných kanálů, u varianty č. 2 rozšíření není a varianta č. 3 vyrovnává tok pomocí postupného rozšiřování tloušťky stěny. Při návrhu vtoku byl použit princip vyrovnání toku varianty č. 1.

Rozšířený tunelový a banánový vtok „Chisel gate“

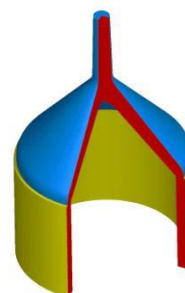
Rozšířený tunelový vtok vznikl kombinací tunelového resp. banánového vtoku a filmového vtoku. Vtok umožňuje automatické oddělení vtoku od dílu. Průřez ústí vtoku je obdélníkový. Pro odformování vtoku je průřez nejširší u kanálu vtoku. Směrem k ústí se zužuje jak šířka, tak tloušťka vtoku. Podobně je řešeno i rozšíření pro banánový vtok. ^{1 s. 166, 1}



Obr. 15: Tři možné varianty tzv. chisel gate. Vznikly kombinací filmového a tunelového, případně banánového vtoku.

Deštníkový vtok

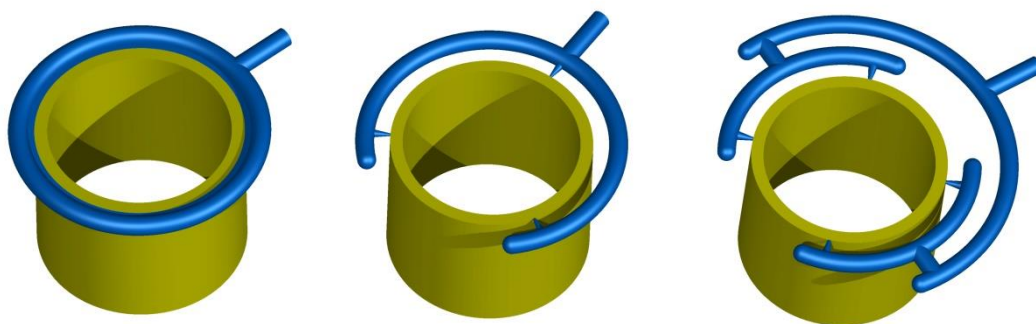
Deštníkový vtok umožňuje jednotné plnění celého příčného řezu válcového dílu. Disk může být plochý nebo do kužele obvykle s vrcholovým úhlem 90° ("deštník"), tavenina je plněna rovnoměrně.



Obr. 16: Řez deštníkovým vtokem

Prstencový vtok

Prstencové vtoky jsou v podstatě filmové vtoky, které se omotaly kolem dutiny. Používají se jako vnější vtoky na válcových součástech. Jsou obvykle používány u dvou-deskových vtokových soustav válcových součástí, které jsou otevřené na obou koncích (jako trubka). Jejich cílem je odstranit nebo minimalizovat studený spoj, poskytují rovnoměrné plnění a minimalizují deformace jádra.



Obr. 17: Tři varianty prstencového vtoku. Druhá a třetí varianta řeší nerovnoměrné plnění vtoku u první varianty.

Nevýhodou je obtížné oddělení vtoku od dílu a nesouměrné plnění. Tři varianty prstencového vtoku jsou vidět na obr. 17. Druhá a třetí varianta zlepšuje rovnoměrnost plnění vyžadující správné vybalancování. Obě varianty snižují deformaci jádra a zlepšují symetričnost součástí. Nevýhodou je vznik studených spojů na plastovém díle v počátku plnění. ^{1 s. 162-163, 1}

Talířový vtok

Talířové vtoky jsou použitelné na válcové díly, které jsou otevřené na obou koncích (jako trubka). Jsou používány v tři-deskovém nebo dvou-deskovém systému. Při plnění nevznikají studené spoje, deformace dílu je minimální a plnění dílu je ideální. Z hlediska plnění je to ideální vtok pro mnoho válcových součástí. Nevýhodou je komplikované odformování. Konstrukce vtoku může používat krátké paprsky v podobě tunelového vtoku. To zajišťuje vyvážené plnění válcových součástí při zjednodušeném odformování. Doporučují se tři až čtyři rovnoměrně rozložené vtoky pro zmenšení deformace. ^{1 s. 162-163, 1}



Obr. 18: Dvě varianty talířového vtoku. Druhá varianta umožňuje automatické oddělení vtoku od dílu.

Rozváděcí kanály

Rozváděcí kanály se dají rozdělit na hlavní a vedlejší. Mělo by platit, že rozváděcí kanály budou zamrzat jako poslední, ale zároveň nebudou zbytečně velké. Hlavní rozváděcí kanál by měl být tak velký, aby bez problému stačil rozvádět taveninu do vedlejších kanálů. Pro přibližný výpočet lze použít vztah

$$S_{HR} = k_n \cdot n \cdot S_R \quad (1)$$

k_n ... koeficient vlivu násobnosti ($n = 2$, $k_n = 0.9$)

($n = 4$, $k_n = 0.7$)

n ... počet rozváděcích kanálů

S_R ... průřez rozváděcího kanálu

Délka rozváděcích kanálů by měla být co nejkratší a pokud možno stejně velká. Nejvýhodnějším tvarem je kruhový průřez, ten má ze všech geometrických tvarů nejmenší obvod a jsou zde proto nejmenší hydraulické ztráty. Jeho nevýhodou je však nákladnější výroba, proto se často nahrazuje lichoběžníkovým profilem.⁴

3 Polymerní materiály jmenované v disertační práci

PC/ABS

Zkratka PC/ABS znamená směs polykarbonátu a akrylonitril-butadien-styrenu. Mechanické vlastnosti směsi jsou velice rozdílné, vliv na mechanické vlastnosti má nejen poměr obsahu obou směsí, ale i poměr jednotlivých složek v ABS. Akrylonitril-butadien-styren je mnohem více navlhavý než polykarbonát. PC/ABS chemicky odolává kyselinám, zásadám, tukům, olejům a alkoholu, neodolává rozpouštědlům, uhlovodíkům, typické

korozí za napětí, UV záření. Jako zástupce amorfních plastů je velice citlivý na smykové namáhání.^{2, 5}

PC

Polykarbonát je amorfní rozvětvený termoplast s vysokou rázovou odolností a vyšší pevností. Je čirý a málo navlhavý, což má za následek dobrou rozměrovou stálost, ale při zpracování degraduje. Jeho malá navlhavost je způsobena bisphenolem A, který se používá k výrobě polykarbonátu. Díky absenci C-H vazby je málo náchylný k oxidaci při teplotách kolem 300°C. Polykarbonát velice dobře pohlcuje světelné záření, a tak odolává UV záření. Neodolává zásadám, horké vodě a uhlovodíkům, což je dáno jeho esterovou skupinou. Odolává slabým kyselinám, benzinům a olejům.^{2, 5}

LDPE

(Low density polyethylen) Nízko hustotní materiál s rozvětvenou strukturou makromolekulárních řetězců.

LLDPE

(Linear low density polyethylen) Lineární nízko hustotní materiál, díky menší rozvětvené struktuře má oproti LDPE menší náchylnost na smykové namáhání.

HDPE

(High density polyethylene) Vysoko hustotní materiál s lineární strukturou makromolekulárních řetězců. Tuhost materiálu roste s mírou hustoty řetězců.

PP

Semikrystalický polymer s rozvětvenou strukturou, dobře zpracovatelný, hodící se na exteriérové i interiérové aplikace. Při toku někdy dochází k tzv. tygr efektu.

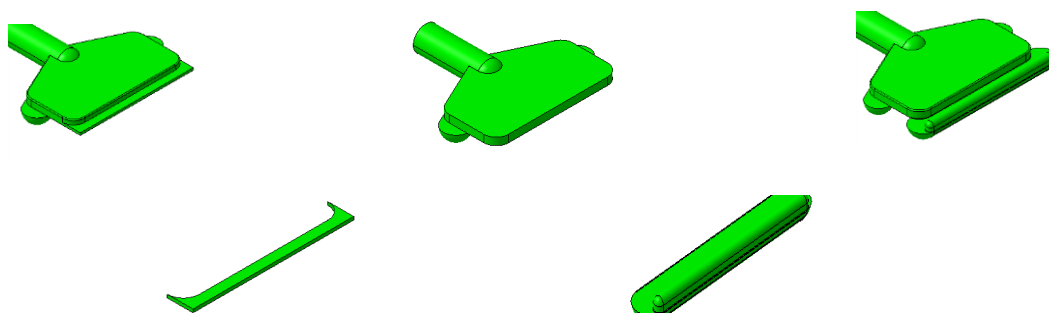
PVC

PVC snadno degraduje při velké smykové rychlosti a projevuje se stříbřením.

Vstřikování PVC vyžaduje pomalou vstřikovací rychlost, zaoblené hrany a dobře odvdzdušněnou formu kvůli vylučování výparů z taveniny, při špatném odvdzdušnění formy může dojít ke korozi.^{2, 5}

4 Návrh modifikované geometrie vtoku

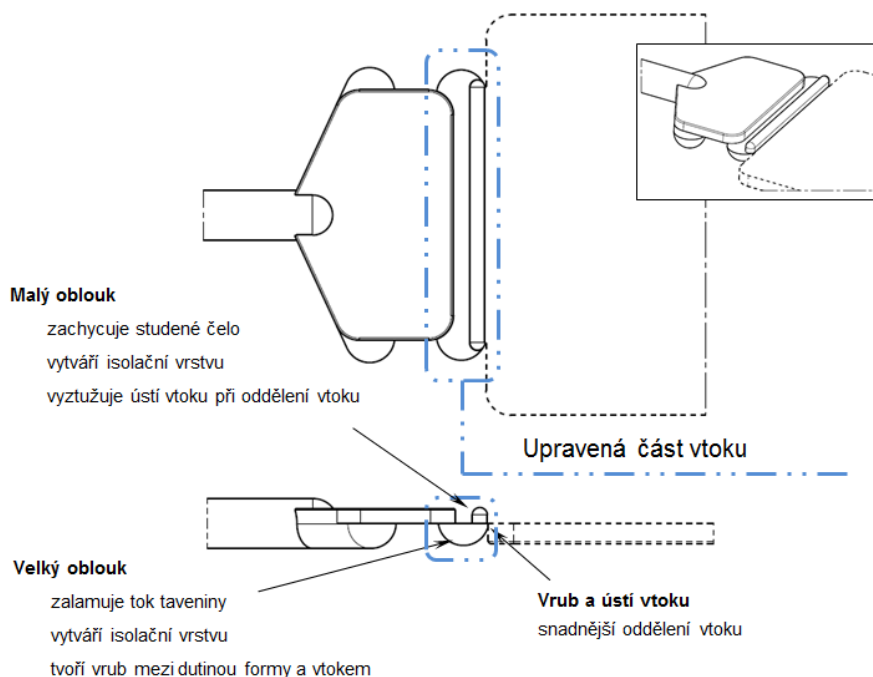
Podobně, jako došlo v minulosti k úpravě tunelového a banánového vtoku za účelem vytvoření izolované vrstvy a zvýšení teploty taveniny v oblasti ústí vtoku, byl na základě tohoto principu modifikován filmový a talířový vtok (obdobu filmového vtoku pro plnění kruhových výrobků). Zvýšily se tak jejich užité vlastnosti a můžeme je aplikovat i v podmínkách, kdy by při použití standardního filmového (talířového) vtoku mohlo docházet ke vzhledovým vadám finálního produktu. Podstatou technického řešení je dosáhnout vhodných tokových podmínek v oblasti ústí vtoku pro PC/ABS, vycházející z obecně známých reologických zákonů pro ne-Newtonske kapaliny (nelineárně viskózní látky).



Obr. 19: Princip modifikace filmového vtoku, zúžená část je nahrazena dvěma vzájemně přesazenými oblouky

Modifikace spočívá v úpravě nejtenčí části filmového vtoku (obr. 19), která je u tohoto vtoku z důvodu snazšího odlomení od dílu. Třebaže filmový vtok bývá oproti jiným vtokům dostatečně dimenzovaný, může v extrémních případech dojít k výraznému smykovému namáhání materiálu právě v této zúžené oblasti vtoku, ve které dále dochází k rychlejšímu tuhnutí taveniny a zmenšování aktivního průřezu ústí vtoku. To má za následek zkrácení doby, kdy lze kompenzovat objemové kontrakce materiálu v dutině formy. Také často po odlomení vtoku zůstává zbytek vtoku na díle a je nutné dodatečné začištění. Modifikace filmového a talířového vtoku se vyznačuje zakřivenou geometrií s dvěma naproti sobě obrácenými oblouky, které lze snadno vyrobit kuličkovou frézou nebo elektroerozivním obráběním. Tvar ústí vtoku

je totožný s filmovým vtokem a umožňuje porovnání obou variant. Podstatou celé úpravy je zkrácení zúžené části filmového vtoku na hodnotu limitně se blížící nule a vytvoření dostatečné tepelné izolace taveniny těsně před ústím vtoku. Nedochozí tak ke zmenšení průřezu ústí vtoku v důsledku poklesu teploty taveniny. Běžnou aplikací takového vtoku by měli být materiály citlivé na smykové namáhání s požadavkem na co nejmenší ústí vtoku (malá vzhledová stopa po vtoku).



Obr. 20: Návrh konstrukce upraveného vtoku (realizovaná varianta). Vtok vychází z filmového vtoku a nově řeší zúženou část před ústím vtoku. Nově navržená část je na obrázku označena modrou – dvojité čerchovanou čarou.

První největší oblouk zalamuje tok taveniny tak, aby tavenina netekla přímo do dutiny formy, ale nejprve do druhého menšího oblouku, umístěném těsně před dutinou formy. První oblouk tak usměrňuje taveninu a zároveň vytváří zaoblený vrub v místě ústí vtoku. Druhý oblouk vtoku umožňuje zachycení čela taveniny a tepelně izoluje ústí vtoku. Po zatuhnutí taveniny má spolu s velkým obloukem vyztužující účinek usnadňující lámání vtoku od dílu. Lámání vtoku výrazně napomáhá i vrub vytvořený velkým obloukem. Každý z oblouků je zaformovaný v jiné polovině formy, velký i malý oblouk může být zaformovaný jak na pohyblivé straně formy, tak i na pevné. Obecně vyšší vstřikovací rychlosti přinášejí riziko vzniku jettingu. Vady, kdy materiál netvoří fontánový tok, ale materiál má podobně jako u vytlačování

profil ústí vtoku, teče do volného prostoru a při tečení se projevuje nesmáčením dutiny formy taveninou. Rychlost toku je tak vysoká, že elasticita taveniny nedokáže vyrovnat rychlost tečení a tavenina proudí volně do dutiny formy.

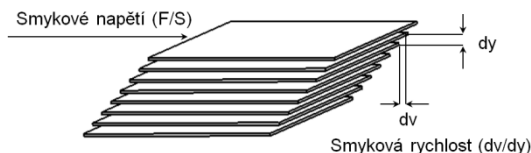
U modifikovaného vtoku je vytvořeno zalomení toku taveniny (obr. 20) pomocí dvou obrácených oblouků a zpomalení taveniny o protilehlou stěnu zkušební destičky. Tavenina v dutině formy neteče volně do prostoru, ale je směřována na stěnu formy. To vytváří odpor proti tečení a tavenina se dále formuje do fontánového toku.

Celá modifikace filmového vtoku ve své podstatě zlepšuje tepelně izolační vlastnosti mezi taveninou a dutinou formy. Tavenina se při styku se stěnou formy ochlazuje a vytváří zatuhlou vrstvu. Dochází tak v průběhu plnění dutiny formy k negativnímu zmenšování průřezu, smyková rychlost roste a současně dochází k vývinu třecího tepla. Zamrzlá vrstva roste do doby, než se vyrovná teplo odvedené formou s tepelnou energií vzniklou smykovým třením. Velikost zamrzlé vrstvy zůstává dále prakticky neměnná po dobu plnění. Ve fázi dotlaku již nedochází k vývinu třecího tepla a ústí vtoku je výhodné tepelně izolovat a prodloužit dobu dotlaku. Pro tento účel má modifikovaná geometrie první i druhý oblouk.⁷

5 Newtonské kapaliny

V obecné hydrodynamice byl zaveden termín ideální tekutina, která není vazká (nemá tření) a je nestlačitelná. V historii byla ideální tekutina zavedena ke snadnému odvození některých zákonů. Na vazkou tekutinu mohou působit tlakové i smykové síly.³⁴

Newtonská kapalina (tekutiny se dělí na kapaliny a plyny) se při působení tečných sil trvale deformuje a uvádí se do pohybu (po odlehčení se deformace již nevrací do původního stavu). Viskozita tekutiny je odpor proti pohybu jednotlivých vrstev tekutiny. Při pohybu tekutiny se energie vynaložená na deformace přeměňuje v tepelnou energii.^{2, 9, 35}



Obr. 21: Laminární tok s jednoduchým smykem, dy ... přírůstek tl. stěny, dv ... přírůstek rychlosti. ³⁵

Na jednoduchém modelu obr. 21 lze vysvětlit vnitřní mechanismus při toku kapaliny, mějme kapalinu mezi pevnou a pohybující se deskou. Kapalina se díky smykovým silám mezi jednotlivými vrstvami začne deformovat a vznikne laminární tok nestlačitelné Newtonské kapaliny. ¹⁸

Smykové napětí mezi jednotlivými deskami lze spočítat jako,

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

τ ... smykové napětí mezi vrstvami

F ... síla působící na pohybující se desku

S ... plocha vrstvy

μ ... dynamická viskozita

$\frac{dv}{dy}$... gradient rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu

$\dot{\gamma}$... smyková rychlost

dynamická viskozita se někdy nahrazuje kinematickou viskozitou

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

ν ... kinematická viskozita

ρ ... hustota

Hodnoty dynamické viskozity lze získat experimentálně pomocí viskozimetrů. V současné době jsou tyto hodnoty materiálů známy pro většinu materiálů a závisí na teplotě a tlaku. Grafická závislost smykové rychlosti a smykového napětí se nazývá tokové čáry.

Tavenina polymeru se chová jako Newtonská kapalina při malých smykových rychlostech.

6 Ne-Newtonské kapaliny a taveniny polymerů

Ne-Newtonské kapaliny se od Newtonských kapalin liší svojí nelineární závislostí viskozity na smykové rychlosti a zpožděnou reakcí do beznapěťového stavu, tzv. relaxací. Popis ne-izotermického viskoelastického toku je složitý a proto se využívá Newtonských modelů se základními vlastnostmi ne-Newtonských kapalin.²

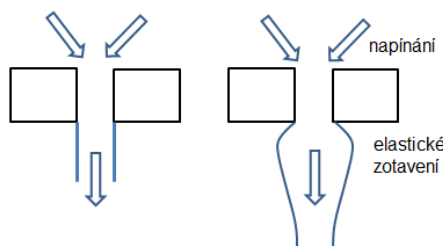
Ne-Newtonské kapaliny lze rozdělit do několika skupin, tyto materiály často splňují více vlastností dané skupiny:

- časově nezávislé ne-Newtonské kapaliny neboli čistě viskózní kapaliny
 - kapaliny s mezí průtažnosti
 - Bighamské kapaliny
 - Pseudoplastické (gumy, taveniny polymerů, barvy)
 - Newtonské
 - Dilatantní
- časově závislé ne-Newtonské kapaliny
 - Thixotropické kapaliny
 - Rheopectické kapaliny
- viskoelastické kapaliny (taveniny polymerů, rosoly)¹³

Chování polymerních kapalin úzce souvisí s jejich vnitřní strukturou a uspořádáním vnitřních shluků makromolekul do směru toku. Projevují se odporem a rychlostním profilem a v souvislosti s orientací makromolekul lze vnitřní strukturu pozorovat pod mikroskopem. Polymerní taveniny se chovají jako viskoelastické kapaliny a k jejich popisu se v případě $We > 1$ nejlépe hodí ustálený ne-izotermický viskoelastický model. Je to složitý nelineární model často vedoucí k neřešitelným úlohám. Viskoelastické chování je zároveň elastické, plastické a zpožděně elastické. K plastické deformaci je zapotřebí nejdříve překonat určité napětí, do té doby se materiál chová pouze elasticky.

U čistě viskózních látek je napětí konstantní v závislosti na prodloužení, energie vynaložená na deformaci se přeměňuje v kinematickou resp.

v tepelnou energii (teplo způsobené třením). Tato deformace je trvalá a nazývá se plastický tok. U ideálně elastických látek se deformace projeví okamžitě a je přímo úměrná napětí. Veškerá práce vynaložená na deformaci je v tělese ukládána jako potenciální energie a lze jí získat zpět po zrušení vnějšího napětí. Deformace zpožděně elastická je závislá na čase. Viskoelasticita kombinuje všechny tyto deformace.



Obr. 22: Vytlačování, vlevo chování Newtonské kapaliny, vpravo chování viskoelastické kapaliny

U viskoelastických kapalin může docházet k laminárnímu nebo turbulentnímu toku. Tuto mez určuje tzv. Reynoldsovo číslo, které definuje tři oblasti, laminární, přechodovou a turbulentní. Turbulence provází víření a obvykle vzniká za kontrakcí kanálu.^{59, 18, 22, 23, 29, 30}

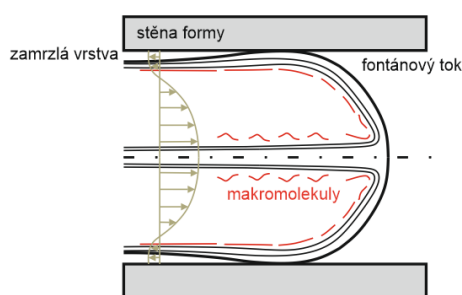
6.1 Mechanismus laminárního toku polymerních tavenin

Při laminárním proudění vzniká tzv. fontánový tok, objevený již v roce 1911 Westem.¹² Středem kanálu proudí tavenina, která se na čele fronty rozděluje a dále ulpívá na stěně formy. V podstatě dochází k efektu odvalování nekonečného množství vrstev. Při tomto ději se jednotlivé makromolekuly natahují přičemž největší orientace makromolekul je v krajních vláknech. Za normálních podmínek jsou makromolekuly sbaleny do nahodile uspořádaných shluků, někdy nazývané klubíčka a při tečení pak dochází k jejich narovnávání a napínání do směru tečení taveniny. Velikost a stupeň orientace makromolekul ovlivňuje především smykové a normálové napětí související s průběhem teploty, smykovou rychlostí, viskozitou, atd. (podrobněji viz kapitola 6.2).

Z pozorování zkoušek s obarvením toku viskoelastických kapalin vyplývá, že symetrický rychlostní profil fontánového toku je u stěny formy ve srovnání se středem toku záporný obr. 23. Coyle porovnává tvar obarvených proudnic toku viskoelastické kapaliny s numerickou analýzou. Okrajové podmínky

analýzy umožňují pozorovat smykové rychlosti spolu s osovým pohybem toku a porovnává výsledky se skutečnou zkouškou. Výsledky se shodují a dokazují záporný rychlostní profil na okraji stěny formy, v důsledku fontánového toku a normálových deformací taveniny.^{13, 37}

Podle některých studií, např. Heinemann dochází k nesymetrickému fontánovému toku projevující se vizuální vadou cyklicky se opakujících tmavých pruhů tzv. tygr efekt.³¹ Dříve provedené zkoušky např. Changa (1994) dokázaly příčinu nestability v elastické složce taveniny a menší tygr efekt u materiálů s vyšší elasticitou smykové deformace.^{14, 30, 53}

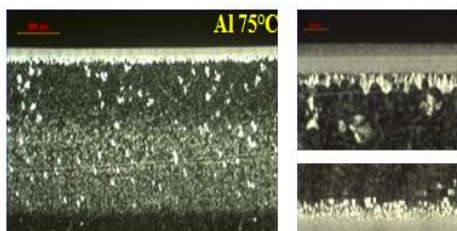


Obr. 23: Model fontánového toku, makromolekulární řetězec se ze středu dostává do okrajové vrstvy, zamrznutím v povrchové vrstvě dojde k zafixování řetězce a v povrchové vrstvě dochází k největšímu smykovému i normálovému napětí.

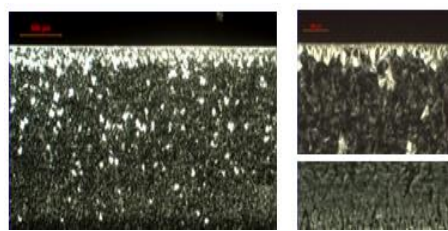
6.2 Orientace makromolekul při laminárním toku polymerních tavenin

Orientace makromolekul hraje významnou roli pro konečné vlastnosti materiálu a závisí na několika vlivech. Orientovaná struktura způsobuje anizotropické vlastnosti materiálu především při odvodu tepla a mechanickém namáhání. Zkouškami bylo zjištěno, že např. tepelná vodivost roste ve směru orientace makromolekul.

Distribuci orientované struktury lze rozdělit do třech vrstev s různou mírou orientace. První vrstva s nejvíce orientovanou strukturou je těsně u stěny formy a je ve směru toku. Druhá vrstva tvoří přechod mezi jádrem a povrchovou vrstvou. Třetí vrstva je orientovaná kolmo na směr toku a nazývá se jádro. Tato vrstva má například největší vliv na smrštění materiálu. Konečnou orientaci makromolekul a tloušťku povrchové vrstvy ovlivňuje mnoho vnějších a vnitřních faktorů jako teplota taveniny, teplota formy, tepelná vodivost formy a taveniny, doba procesu (relaxační děje), smyková rychlost, resp. smykové napětí, tvar makromolekulárního řetězce, atd.^{8, 26}



Obr. 24: Morfologie povrch-jádro, PP, 4x1.67, vpravo detail povrch – přechodová vrstva – jádro 20x1.67, 60cm³/s, ocel/ hliník, blízko vtoku²⁵



Obr. 25: Morfologie povrch-jádro, PP, 4x1.67, vpravo detail povrch – přechodová vrstva – jádro 20x1.67, 60cm³/s, ocel/ hliník, daleko od vtoku²⁵

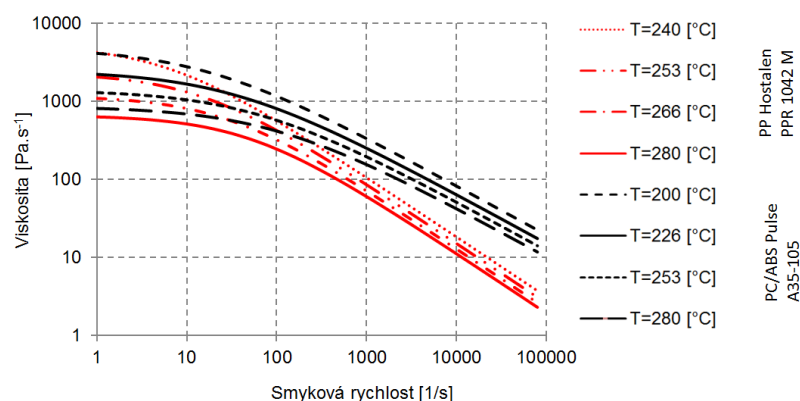
6.3 Viskozita polymerních tavenin

Viskozita viskoelastických kapalin má smykovou i tahovou podobu. V průmyslovém zpracování plastů dochází ke kombinaci smyku a tahového dloužení. Tahové dloužení se vyskytuje u všech zpracovatelských technologií jako válcování, tvarování, vytlačování, vyfukování nebo vstřikování.

6.3.1 Smyková viskozita

Smyková viskozita η viskoelastických kapalin je v oblasti malých smykových rychlostí $\dot{\gamma}$ konstantní a kapalina se chová jako Newtonská, se zvyšující se smykovou rychlostí smyková viskozita klesá až do hodnoty viskózního toku. Převrácená hodnota času relaxace λ_r udává smykovou rychlost, kdy se Newtonské chování mění v tixotropní. Viskozita souvisí s teplotou taveniny, tlakem, procesní historií, molekulární hmotností, atd. Viskozita je tak funkcí několika proměnných.

Tato vlastnost polymerních tavenin je dána jejich makromolekulární strukturou. V klidovém stavu jsou makromolekuly sbaleny do pro ně nejvýhodnější energetické polohy, tvar může připomínat „klubíčka“. Při působení vnějších sil dochází k natahování těchto makromolekul, přičemž odpor proti pohybu (síle) kladený sbalenými makromolekulami klesá s mírou jejich natažení. Teoreticky při úplném rozbalení všech makromolekul se viskozita ustálí na konstantní hodnotě, ve skutečnosti ještě před dosažením této hodnoty dochází k poruše (přetržení) řetězců.^{9, 10}



Obr. 26: Průběh smykové rychlosti pro PC/ABS a PP při různých teplotách. Data získaná z Autodesk Moldflow.

Závislost na teplotě

Závislost viskozity na teplotě lze spočítat analyticky nebo empiricky a udává ji tzv. Vankrevelen–Hoftijzer viskozita – teplota vztah. Největší vliv teploty je v oblasti přechodové teploty skelného stavu u amorfních plastů a teploty tání u semikrystalických plastů.

Arrhenius model je dán rovnicí:

$$\eta = B \exp\left[\frac{E_\eta}{RT}\right] \quad (4)$$

B ... konstanta

T ... teplota

R ... universální plynová konstanta

E_η ... aktivační energie viskózního toku

Podle van Krelevana (2009) v průměru platí, že zvýšení tlaku o 100MPa bude mít stejný efekt na viskozitu jako snížení teploty o 40°C. ¹⁸

Závislost na molární hmotnosti

$$\log \eta_0 = 3,4 \log M_w + A \quad (5)$$

A ... empirická konstanta, závisující na materiálu a teplotě

M_w ... molární hmotnost

6.3.2 Tahová (elongační) viskozita

Čistě elongační tok neobsahuje smykové síly a rotace, tok se pohybuje v jedné nebo ve dvou osách. Tahová viskozita má ve tří-rozměrném systému dvě složky.

$$\eta_1^+(\dot{\varepsilon}_0, t) = \frac{(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (6)$$

$$\eta_2^+(\dot{\varepsilon}_0, t) = \frac{(\sigma_{zz} - \sigma_{yy})}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (7)$$

při jedno-osovém napětí je $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ a $\eta_E \cong \eta_1^+$

Tahová viskozita viskoelastických kapalin je při Newtonské viskozitě η_0 rovna Troutonovu poměru $Tr = 3$:

$$Tr = \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{\dot{\varepsilon}} = \frac{\eta_E}{\eta_0} \quad (8)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t} = \frac{\log\left(\frac{L(t)}{L_0}\right)}{t} \quad (9)$$

Se zvyšující se smykovou rychlostí (resp. se zvyšující se rychlostí deformace), v oblasti poklesu smykové viskozity, dochází ke zpevnění a tahová viskozita roste. S dalším růstem smykové rychlosti, tahová viskozita opět klesá a má přibližně trojnásobnou hodnotu smykové viskozity.^{33, 65}

Pro lineární viskoelastické materiály platí

$$\eta_{LVE}^+(t) = \sum_{k=1}^N 3\eta_k [1 - \exp(-t/\lambda_k)] \quad (10)$$

η_k ... kontribuční viskozita

λ_k ... kontribuční čas relaxace

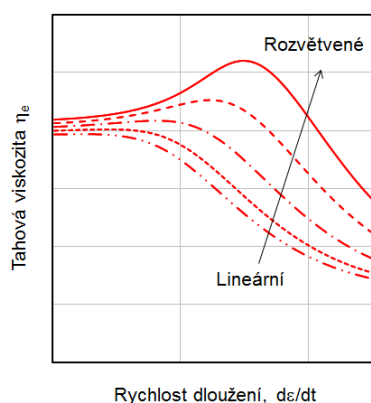
Pro materiály s ustálenou tahovou viskozitou a poměrem $t \gg \lambda_k$, přibližně platí Troutonův poměr $Tr = 3$.

Při tahovém zpevnění platí pro tahovou viskozitu

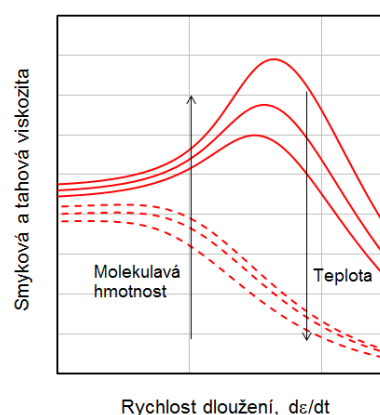
$$\frac{\eta_E(\dot{\varepsilon}_t, t)}{\eta_{LVE}(t)} > 1$$

Při tahovém dloužení s poklesem viskozity platí

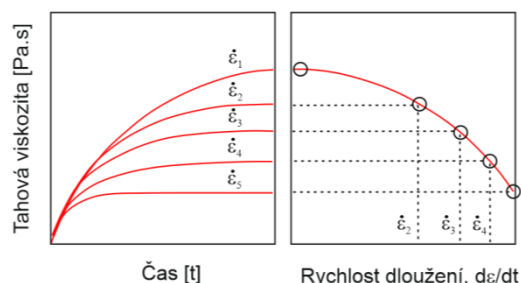
$$\eta_E(\dot{\varepsilon}_0) > \eta(\dot{\gamma})$$



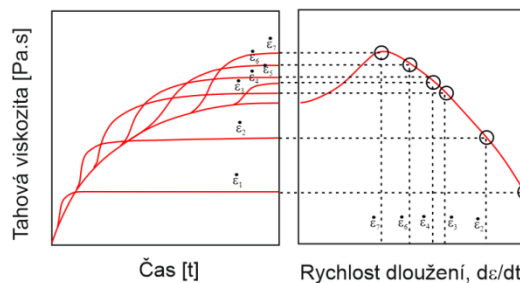
Obr. 28: Efekt rozvětvení na tahovou viskozitu polymerních tavenin³³



Obr. 27: Efekt teploty a molekulové hmotnosti na smykovou viskozitu (čárkovaná) a tahovou viskozitu (plná) polymerních tavenin³³



Obr. 30: Tahová viskozita v závislosti na rychlosti dloužení neelastických kapalin vytvořená z dat získaných pomocí viskozimetru³³



Obr. 29: Tahová viskozita v závislosti na rychlosti dloužení elastických kapalin vytvořená z dat získaných pomocí viskozimetru. $\dot{\epsilon}_1 > \dot{\epsilon}_2 > \dot{\epsilon}_3 > \dot{\epsilon}_4 > \dot{\epsilon}_5 > \dot{\epsilon}_6 > \dot{\epsilon}_7$ ³³

Komerčně využívané reometry pro měření tahové viskozity

Rheotens Rheometer, CaBER Rheometer, Sentmanat Extensional Rheometer, FiSER Rheometer, RFX Rheometer, RME, MXR2 Rheometer

6.4 Tepelná vodivost polymerních tavenin

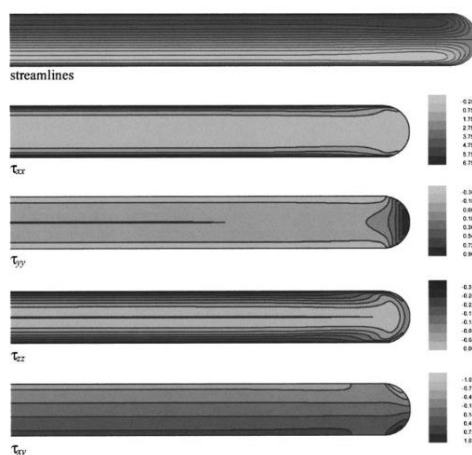
Tepelná vodivost materiálů je poměr mezi tepelným tokem a teplotním gradientem. Obecně souvisí se schopností přenášet vzájemný tepelný pohyb částic a především souvisí s chemickou strukturou polymeru a stavem, ve kterém se nachází. Částice v polymerech jsou spojeny oproti kovům slabými mezimolekulárními silami a plasty jsou tak relativně dobrými izolanty. Především pak plněné. Semikrystalické plasty vedou o něco lépe teplo než amorfní.¹⁶

Plasty mají obecně největší tepelnou vodivost v oblasti přechodové teploty. Ve skelném stavu tepelná vodivost roste do svého maxima a v oblasti taveniny opět klesá. U semikrystalických polymerů souvisí ještě tepelná

vodivost s podílem krystalické fáze a zároveň se směrem orientace makromolekul. Podle Hellwega (1963) tepelná vodivost roste ve směru a stupni orientace makromolekul a kolmo na směr orientace tepelná vodivost klesá.⁶⁰

6.5 Napětí při laminárním toku polymerních tavenin

Podle Bogaerds (2002), který pomocí izotermického viskoelastického modelu XPP (eXtended Pom Pom model) zahrnujícím i orientaci a tvar makromolekul, namodeloval fontánový tok včetně výpočtu jeho napětí, dochází při toku taveniny smykovou rychlostí odpovídající vstřikování (nad 1000 s⁻¹) k namáhání smykovými i normálovými silami.⁵³ Vzhledem k charakteru toku, kdy se tavenina procházející horkým jádrem na okraji fronty stáčí a ulpívá na stěně formy, je čelo taveniny namáhané tensorem napětí kolmo na směr tečení T_{22} . Při ustáleném toku dochází v krajních vláknech k natahování makromolekul a působí zde normálový tensor napětí T_{11} spolu se smykovým namáháním T_{12} .

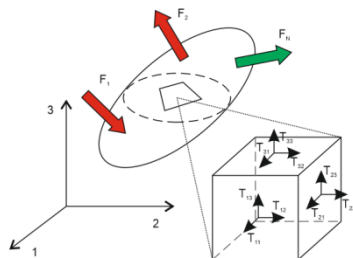


Obr. 31: Tensor napětí pro fontánový tok, XPP model.⁵³

V reálných podmínkách musíme počítat s ne-izotermickým dějem a změnou chování polymeru v důsledku poklesu viskozity a tvorby zamrzlé vrstvy (tzv. skin). V oblasti zamrzlé, resp. přechodové vrstvy je smyková rychlost maximální a objevuje se zde dloužení úměrně orientace makromolekul.

6.5.1 Tensor napětí

Pro popis napětí se používá Cauchyho tenzor druhého řádu. Tenzor je lineárně vektorová funkce vektorové proměnné a lze si jej představit jako elipsoid s daným směrem.³⁶



Obr. 32: Tensor napětí v třídimenzionálním kartézském souřadném systému³⁶

$$T = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix}$$

T_{11} ... tensor napětí ve směru toku (proudnice)

T_{22} ... tensor normálového napětí ve směru kolmo na směr toku

T_{33} ... zanedbatelné normálové napětí

$T_{12,21}$... tensor smykového napětí

Tensor napětí v mechanice tekutin

$$\sigma_{ik} = -p\delta_{ik} + \sigma'_{ik} \quad (11)$$

δ_{ik} ... Kronecker delta (logický operátor $i=k, i \neq k$)

p ... tlak

Tensor napětí při proudění kapalin souvisí s tzv. Navier-Stokes rovnicemi a v případě ne-izotermického děje také s energetickou bilancí. Rovnice pojmenované po Cloude Louis Navier a George Gabriel Stokes vychází z rovnice kontinuity a z pohybové rovnice a všechny rovnice včetně tepelné bilance musí být řešeny současně. Napětí je funkcí gradientu rychlosti a tlaku.

Podrobný výpočet Navier-Stokes rovnic a energetické bilance je popsán v kapitole 7.

Pro rovnici kontinuity a pohybovou rovnici platí:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (12)$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} = \rho \mathbf{g} \quad (13)$$

p ... tlak

\mathbf{T} ... extra stress tenzor

\mathbf{f} ... hybnost

ρg ... gravitační síly na jednotku objemu

6.5.1.1 Tensor napětí se zanedbáním viskoelastické složky

U tohoto výpočtu se pracuje pouze s viskózním tokem a viskoelastická složka se zanedbává. Výpočet tak nepracuje např. s vířením, elasticitou při extruzi, rozdílem normálových napětí. Umožňuje to zjednodušení, resp. urychlení výpočtu, aniž by ve většině případů došlo k výrazným odchylkám ve výpočtech ve srovnání se skutečností.

$$T = 2\eta D \quad (14)$$

η ... viskozita závislá na smykové rychlosti a teplotě

D ... tensor rychlosti (gradient rychlosti)

Výpočet viskozity je proveden pomocí zvolených modelů viskózních křivek Power law, Bird Carrau, Ellis, Cross, atd., viz. kapitola 9.2.1.

str. 215-233, 54

6.5.1.2 Tensor napětí pro viskoelastickou kapalinu

Napětí při laminárním toku viskoelastických kapalin obsahuje napětí s plastickou i elastickou složkou, která jsou normálová nebo tečná. U viskoelastického toku se počítá tzv. celkový napěťový tensor, který se skládá z viskoelastické složky T_1 a čistě viskózní složky T_2 .

$$T = T_1 + T_2 \quad (15)$$

Pro čistě viskózní složku platí:

$$T_2 = 2\eta_2 D \quad (16)$$

η_2 ... viskozita pro čistý smyk

D ... tensor rychlosti definovaný vztahem $D = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T)$

Tensor viskoelastické složky T_1 se vypočítá podle modelů viskoelastického chování. Výpočet zahrnující strukturu polymerních řetězců takto počítat nelze. Výpočet platí např. pro Oldroyd_B, Maxwell, White-Metzner, PTT, Giesekus, atd. Více v kapitole 9.2.2 a 9.2.3.

$$g(T_1) \cdot T_1 + \lambda_{r1} \frac{\delta T_1}{\delta t} = 2\eta_1 D \quad (17)$$

$$\eta_1 = (1 - \eta_r)\eta \quad (18)$$

$$\eta_2 = \eta_r \eta \quad (19)$$

$g(T_1)$... specifická funkce modelu

λ_{r1} ... čas relaxace

η ... viskozita Newtonského toku

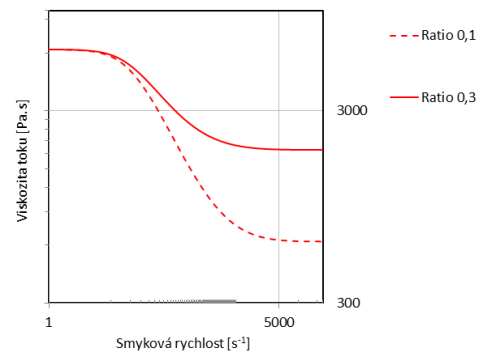
η_1 ... viskozita vypočtená dle zadaného modelu

η_r ... poměrná dynamická viskozita,

Stabilizace výpočtu:

V případě, že pro PTT model je $\xi = 0$ a pro Giesekus model je $\alpha > 0,5$ je potřeba pro stabilizaci výpočtu započítat do celkového tensoru napětí také čistě viskózní složku. V tomto případě musí být poměr Newtonské viskozity η_2 k celkové viskozitě η roven nebo větší než 1/9.

str. 233-275, 54



Obr. 33: Vliv poměru viskozity η_r na průběh smykové viskozity v závislosti na smykové rychlosti

6.5.1.3 Rozdíl normálových napětí

Charakter viskoelastických kapalin je dán jejich elasticitou a rozdílem normálových napětí. Newtonské kapaliny mají rozdíl normálových napětí roven nule. Důležitou veličinou je první a druhý rozdíl normálových napětí

$$N_1(\dot{\gamma}) = T_{11} - T_{22} = \psi_1(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (20)$$

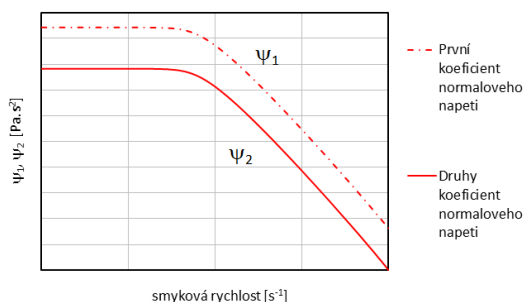
$$N_2(\dot{\gamma}) = T_{22} - T_{33} = \psi_2(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (21)$$

$\psi_{1,2}$... první a druhý koeficient normálového napětí, materiálová funkce závislá na smykové rychlosti a teplotě získaná pomocí měření na viskozimetru. Charakterizuje elasticitu viskoelastické kapaliny. Pro Newtonské kapaliny je koeficient roven nule. Klesá s rostoucí smykovou rychlostí. ¹⁸ První koeficient normálového napětí v závislosti na smykové rychlosti určuje čas relaxace.

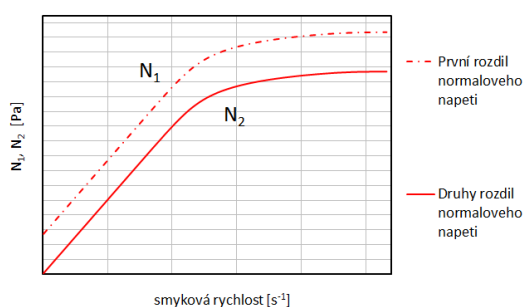
N_1 ... pro polymery je koeficient kladný, pro Newtonské kapaliny je koeficient nulový

N_2 ... může být záporný nebo kladný a je několikanásobně menší než N_1 . Poměr N_2/N_1 se pro taveniny plastů pohybuje 0,24 pro lineární a 0,3 pro rozvětvené makromolekulární struktury a tento poměr roste se smykovou rychlostí.^{47, 48, 21}

Z dřívějších pozorování vyplývá, že při smyku viskoelastických látek je nutné na těleso působit normálovými napětími, jinak vzniká normálová deformace. To znamená, že se látka deformuje i do jiných směrů, než je směr toku. V případě, že je elastická kapalina nucena k toku, je ve směru toku méně stlačena než ve směru kolmém. Působením normálových napětí vzniká např. tzv. Weissenbergův jev, kdy točením míchátko v roztoku polymeru dochází k namotávání polymeru na míchátko a pohybu roztoku směrem nahoru.



Obr. 35: Průběh prvního a druhého normálového koeficientu



Obr. 34: Průběh prvního a druhého normálového rozdílu

6.5.1.4 Mezní hodnoty napětí a smykové rychlosti v povrchové vrstvě

Smykové a normálové napětí vznikající při toku vazké kapaliny je největší v povrchové vrstvě a je kombinací smyku a tahového dloužení. Při neizotermickém ději dochází k ohřevu nebo ochlazení povrchové vrstvy v závislosti na výrobní technologii. Povrchová vrstva má tak různou strukturu (pevnost, tloušťku, viskozitu, atd.). Napětí vyvolané v povrchové vrstvě může vyvolat strhnutí povrchové vrstvy nebo vznik vzhledové vady (reliéf). Tento jev se také nazývá zdánlivý skluz a byl poprvé objeven u vytlačování, kde vlivem vysokého napětí v povrchové vrstvě dochází ke ztrátě lesku (především u LLDPE).⁶⁹ Tento jev byl zaznamenán i při malém Reynoldsově čísle a vysoké viskozitě materiálu.^{53, 55}

Rosenbaum navrhl Power law model popisující právě tento jev a našel výpočet rychlosti, kdy dochází k posuvu povrchové vrstvy.

$$u_z = \frac{a}{1 + (\sigma_c / \sigma_w)^K} \sigma_w^i \quad (22)$$

Existují dva modely popisující skluz povrchové vrstvy, první popisuje mechanismus jako skluz celé makromolekuly, kdy tečné síly překonají přídržné síly mezi makromolekulou a stěnou formy, druhý popisuje mechanismus jako rozbalení makromolekuly mezi stěnou formy a zbytkem materiálu.

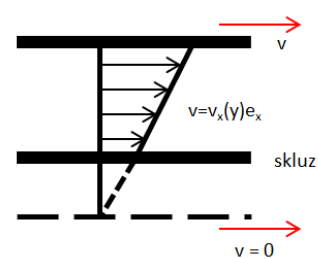
Při výrazném překročení mezních hodnot smykového napětí a smykové rychlosti dochází, kromě skluzu v povrchové vrstvě, k poškození makromolekulárních řetězců. To se projevuje změnou barvy, ztrátou mechanických vlastností, atd. ^{53, 63}

Tab. 2: Hodnoty doporučených maximálních smykových rychlostí a smykového napětí pro některé materiály (Moldflow)

Materiál	Smyková rychlost	Smykové napětí	Materiál	Smyková rychlost	Smykové napětí
PP	100000	0,4	PC	40000	0,5
LDPE	40000	0,1	ABS	50000	0,3
HDPE	65000	0,22	PVC	20000	0,2
POM	40000	0,45	PC/ABS	40000	0,35
PA	60000	0,5	TPE	40000	0,3
PET	50000	0,5	PS	40000	0,24

Při numerických výpočtech lze zadat okrajovou podmínku bez skluzu (no slip) a se skluzem povrchové vrstvy (wall slip). V případě výpočtu bez skluzu je rychlost na hranici kapaliny a stěny formy rovna 0.

Při výpočtu se skluzem je vektor rychlosti roven zvolené hodnotě a tento vektor může být orientován ve směru nebo proti směru toku. Ve skutečnosti při uvažování odvodu tepla je rychlost na povrchu stěny rovna nule, ale v důsledku překročení kritického napětí dochází ke skluzu.



Obr. 36: Vliv skluzu povrchové vrstvy na rychlostní profil toku

6.5.2 Měření smykového napětí polymerních tavenin

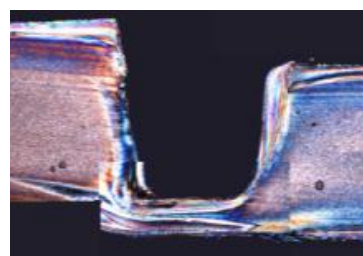
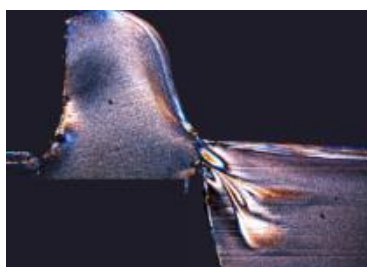
Velikost smykového napětí lze u tavenin polymerů získat např. pomocí viskozimetrů, kde známe některé hodnoty nutné pro dopočítání smykového napětí (teplota, otáčky, rozměry viskozimetru). Tato laboratorní metoda je

používaná pro určení některých materiálových koeficientů, které jsou využívány při dalších teoretických výpočtech.

Při toku taveniny kanálem lze využít metody měření dielektrika taveniny, které se mění (deformuje) vlivem orientace makromolekul. Smykové napětí na okraji kanálu spolu s fontánovým tokem způsobuje orientování makromolekul do směru tečení a následně změnu dielektrických vlastností. Peng použil pro měření smykového napětí růžicový plošný kapacitní sensor 0° , 45° , 90° zaznamenávající změnu napětí v závislosti na změně dielektrických vlastností. Touto metodou lze měřit jak transparentní, tak netransparentní materiál v průběhu plnění. Nedochází tak ke zkreslení výsledků vlivem relaxace makromolekul po zamrznutí taveniny.^{25, 26, 27}

Odhadnout smykové napětí lze také v kombinaci se simulačním softwarem a mírou orientace makromolekul získanou pomocí optického mikroskopu. Ale vzhledem k relaxačním a krystalizačním dějům souvisejícími se strukturou polymeru, teplotním procesem a historií zpracování neodpovídá orientace makromolekul normálovým a smykovým silám vždy přesně.⁸

Různá zbytková napětí lze pozorovat pomocí rentgenových paprsků (X-ray) nebo pomocí polarizovaného světla (čiré plasty), kde se využívá dvojlomu paprsků. Na obr. 37 lze pozorovat oblast ústí filmového a modifikovaného vtoku v polarizovaném světle optického mikroskopu. Vzorky pro tento účel byly vyrobeny ze semikrystalického polypropylenu (Mosten). Vstřikovací parametry byly zvoleny stejné pro modifikovanou geometrii i filmový vtok. Z obrázků lze vyčíst změny v semikrystalické struktuře

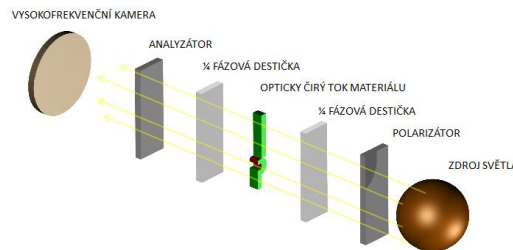


Obr. 37: Řez ústím upraveného a filmového vtoku v polarizovaném světle optického mikroskopu. PP Mosten, $T_i=220^\circ\text{C}$, $T_f=46^\circ\text{C}$, $t_{vstř}=1\text{s}$, bez dotlaku

způsobené silnou orientací makromolekul vlivem napětí při plnění, především v oblasti ústí vtoku. Světlé odstíny zde znázorňují vysokou orientaci makromolekul zkreslenou o dodatečnou relaxaci materiálu. Lze tak

odhadnout místa, kde dochází k největšímu smykovému namáhání, ale již nic nevypovídají o skutečných hodnotách smykového napětí.

Jednou z přímých metod je pozorování napětí v průběhu toku taveniny pomocí dvou sklíčků, polarizátoru a vysokofrekvenční kamery (obr. 38). Podmínkou je mít speciálně upravenou formu a čirý vstříkovaný materiál. Výhodou je přímé pozorování dvojlohu při toku a získání nezkresleného pole napětí.^{56, 57, 58, 59}



Obr. 38: Princip prozařování světla tokem taveniny⁵⁹

7 Matematický popis laminárního toku a odvodu tepla v dutině formy

K popisu tečení kapalin se používá třech základních modelů:

1. rovnice kontinuity (zákon zachování objemu)
2. pohybová rovnice (zákon zachování hybnosti)
3. energetická rovnice (zákon zachování energie nebo první termodynamická věta)

Tyto tři rovnice popisují změny rychlosti, teploty a hustoty ve vztahu k času a poloze v systému, to je základ i k výpočtu tečení tavenin polymerů (ne-Newtonské látky) a přenosu tepla.

7.1 Zákon zachování objemu

Tento zákon je ve tvaru: (přivedené množství = odvedenému množství).

Dostáváme tzv. rovnici kontinuity. Jedná-li se o děj, kde je konstantní hustota, potom:

pro nestlačitelné kapaliny

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (23)$$

u kapalin s proměnou hustotou pak lze psát

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (24)$$

pro přechodový jev potom

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (25)$$

$\nabla \dots$ del operátor pro zjednodušený zápis výpočtu ve třech rozměrech

$u \dots$ rychlost tečení

$\rho \dots$ hustota kapaliny

7.2 Zákon zachování hybnosti

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho V)V - \nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (26)$$

po převedení hybnosti na druhou stranu dostaneme

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho V)V = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (27)$$

kde pro Newtonské kapaliny platí

$$\tau = \mu(\nabla u + \nabla u^T) \quad (28)$$

a pro Viskoelastické kapaliny platí

$$\tau = \mu_s(\nabla u + \nabla u^T) + \tau_p \quad (29)$$

kde jednotlivé členy znamenají:

$\frac{\partial \rho V}{\partial t} \dots$ přírůstek hybnosti na jednotku objemu

$(\nabla \cdot \rho V)V \dots$ míra hybnosti získaná konvekcí na jednotku objemu

$\nabla p \dots$ tlak na jednotku objemu

$\nabla \tau \dots$ míra hybnosti získaná viskozitou na jednotku objemu

$\rho g \dots$ gravitační síly na jednotku objemu

Rovnice (27) vychází z druhého Newtonova zákona síla = hmota x zrychlení a nazývá se Cauchyho pohybová rovnice.

Při zanedbání elasticity a konstantní dynamické viskozitě můžeme rovnici zjednodušit použitím rovnice kontinuity ($\nabla \cdot V = 0$) a dostaneme Navier-Stokes rovnici ve vektorovém tvaru.

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \quad (30)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right] + \rho g_y \quad (31)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (32)$$

Při uvažování stlačitelné kapaliny dostaneme Navier-Stokes rovnice ve vektorovém tvaru použitelné pro tok polymerních kapalin

$$\left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right] \quad (33)$$

$$\left(u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right] \quad (34)$$

$$\left(u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right] \quad (35)$$

$$\left(u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho c_p} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right)\right] \quad (36)$$

Aproximací získaná rovnice faktoru tření pro laminární tok power-law kapalin

$$f \cdot \text{Re}^+ = 1.874 \left(\frac{1.733}{n} + 5.8606\right)^n \quad (37)$$

$$\text{Re}^+ = \frac{\rho U^{2-n} w^n}{K} \quad (38)$$

kde $0,4 < n < 1$, ^{21, 32}

7.3 První termodynamická věta

Energetická bilance může být zapsána ve tvaru vnitřních energií:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(u + \frac{1}{2} V^2\right) = -\nabla \cdot \rho V \left(u + \frac{1}{2} V^2\right) - \nabla q'' + \rho(V \cdot g) - \nabla \cdot PV + \nabla \cdot (\tau \cdot V) + q''' \quad (39)$$

$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(u + \frac{1}{2} V^2\right)$... míra přidané energie na jednotku objemu

$\nabla \cdot \rho V \left(u + \frac{1}{2} V^2\right)$... míra energie vzniklé konvekci na jednotku objemu

$\nabla q''$... míra energie vzniklé kondukcí na jednotku objemu

$\rho(V \cdot g)$... práce vytvořená gravitačními silami

$\nabla \cdot PV$... práce tření vytvořená tlakovými silami

$\nabla \cdot (\tau \cdot V)$... práce tření vytvořená viskózními silami

q''' ... vnitřní zdroj tepla

Energetickou bilanci lze napsat ve tvaru vnitřních energií (39) nebo ve známějším tvaru pro entalpii (40)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\Delta q_x}{\Delta x} - \frac{\Delta q_y}{\Delta y} - \frac{\Delta q_z}{\Delta z} + \dot{Q} + \dot{Q}_{\text{tření}} \quad (40)$$

$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$... vnitřní a kinetická energie

$\frac{\Delta q_x}{\Delta x}, \frac{\Delta q_y}{\Delta y}, \frac{\Delta q_z}{\Delta z}$... míra energie způsobená kondukcí

\dot{Q} ... vnitřní zdroj tepla

$\dot{Q}_{\text{tření}}$... teplo vzniklé třením

Po použití Fourierovy rovnice a za předpokladu izotropického materiálu dostaneme rovnici ve tvaru (41).

$$q = -k\nabla T \quad (41)$$

k ... koef. vedení tepla

∇T ... teplota ve všech souřadnicích

po úpravě do kartézského souřadného systému

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} + \dot{Q}_{\text{tření}} \quad (42)$$

pro smykové napětí platí

$$\tau_{yx} = \mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad (43)$$

τ ... smykové napětí

μ ... dynamická viskozita

u_x ... rychlost ve směru x

Smykové napětí lze nahradit silou působící tečně na plochu a při rozšíření rovnice rychlostí tečení dostaneme energii vzniklou třením

$$\frac{Fu_0}{Ah} = \mu \left(\frac{u_0}{h} \right) \left(\frac{u_0}{h} \right) \quad (44)$$

$$Q_{\text{tření}} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \quad (45)$$

Rovnici energetické bilance pro Ne-Newtonské kapaliny ve tvaru entalpií lze zapsat ve tvaru

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot k \nabla T + \tau : \dot{\gamma} + \dot{Q} \quad (46)$$

rozepsaná rovnice v kartézském souřadném systému

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \mu \theta_v \quad (47)$$

disipační funkce viskozity

$$\theta_v = 2 \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right]^2 \quad (48)$$

19, 20, 21, 22

8 Podobnostní čísla využívaná při toku viskoelastických kapalin

Bezrozměrná čísla (podobnostní kritéria), která charakteristikou fyzikálních jevů určují podobnost dvou různých systémů.

Weissenbergovo podobnostní číslo

Jedná se o bezrozměrné číslo používané při popisu viskoelastického tečení. Udává, o jakou míru se Ne-Newtonska kapalina odchyluje od Newtonské. V případě, že Weissenbergovo číslo bude během tečení velice malé $Wi \ll 1$, viskozita bude nezávislá na smykové rychlosti a rozdíly normálových napětí budou zanedbatelné. Platnost nelineárního chování závisí na Weissenbergově čísle.^{23, 31}

$Wi = \dot{\gamma} \cdot \lambda_r$ někdy uváděno jako We (dochází k záměně s Webrovým podobnostním číslem)

$\dot{\gamma}$... smyková rychlost

λ_r ... čas relaxace

Čas relaxace je dán rovnicí a vyjadřuje dobu vymizení napětí z viskoelastické kapaliny po její deformaci

$$y(t) = \sigma e^{-t/\lambda_r} \quad (49)$$

Z rovnice plyne, že čím delší je doba relaxace, tím se napětí uvolňuje pomaleji a fyzikálně je to čas potřebný k poklesu napětí na $1/e$ hodnoty působícího napětí ($0,367 \cong 1/3$).

$$\lambda_r(T) = \frac{\Psi_1(\dot{\gamma}_r)}{2\eta(\dot{\gamma}_r)} \quad (50)$$

$\Psi_1(\dot{\gamma}_r)$... koeficient hlavního napětí

$\eta(\dot{\gamma}_r)$... viskozita

Čas relaxace lze odečíst ze závislosti viskozity na smykové rychlosti a odpovídá obrácené hodnotě smykové rychlosti. Podle Carreau-Yasuda regrese lze čas relaxace vypočítat jako bod protnutí křivky dané Power-law indexem s maximální viskozitou. Lze tak získat hrubý odhad času relaxace pro daný polymer.³⁸

Čím menší je čas relaxace, tím více se viskoelastická kapalina blíží Newtonské a při výpočtech lze využít modelů Obecně Newtonské kapaliny, aniž by došlo k významným odchylkám. Zároveň se tím řeší problematika konvergence konstitutivních rovnic při vyšším Weissenbergově čísle než jedna.

V drtivé většině se studie zabývají řešením tečení viskoelastických látek s vysokým Weissenbergovým číslem, např. tok viskoelastické kapaliny přechodem mezi kanály s $Wi = 2,8$ (Walters a Webster, 2003) nebo tok okolo díry s $Wi = 0,9$ (Fan, Tanner, Phan-Thien, 1999). Lze říci, že při vyšším $Wi \gg 1$ čísle dochází spíše k viskoelastickému toku a při nižším $Wi \ll 1$ čísle dochází spíše k čistému toku.^{61, 62}

Deborovo podobnostní číslo

Deborovo podobnostní číslo určuje míru elasticity v daném typu deformace. Nebo jinak řečeno, vyjadřuje změnu (rostoucí nebo klesající) ukládané elastické energie. Při ustáleném jednoduchém smyku a konstantním napětí je Deborovo číslo v závislosti na čase rovno nule. Pouze při stavu, kdy se napětí v kapalině mění s časem, je Deborovo číslo nenulové. To vzniká v případech akceleračních dějů při tečení. Deborovo číslo a Weissenbergovo číslo spolu úzce souvisí, proto je mnoho autorů spojuje. Často vyjadřují to samé, ale v některých případech tomu tak není. Deborovo číslo určuje hranici, kdy převládá paměťová složka, Weissenbergovo číslo ne-linearitu.

$$De = \frac{\lambda_r}{t} = \frac{\lambda_r \cdot u}{x} \quad (51)$$

t ... čas procesu

λ_r ... čas relaxace

u ... rychlost toku

x ... dráha toku

Pro $De \ll 0$ relaxuje materiál poměrně rychle a chová se jako viskózní kapalina. Pro $De \gg 0$ nerelaxuje v měřítku časové osy toku vůbec a chová se jako elastický materiál.^{23, 31}

Reynoldsovo podobnostní číslo

Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina dávající do souvislosti setrvačné síly a viskozitu materiálu. Jeho velikost udává míru vlivu třecích sil na celkový odpor tekutiny. Používá se při výpočtu tečení a přenosu tepla.

Obeční matematický zápis je:

$$Re_a = \frac{uL}{\nu} \quad (52)$$

u ... rychlost toku

L ... délka kanálu

ν ... kinematická viskozita

Tento zápis však pro spoustu ne-Newtonských aplikací kvůli jejich proměnné viskozitě není zcela přesný a používají se jeho modifikace. Dle *Young I. Cho* lze Reynoldsovo číslo definovat pěti různými způsoby: ^{kap. 10.9, 23}

- Re' od pánů Metznera a Reeda
- Reynoldsovo číslo vycházející ze zdánlivé viskozity u stěny, Re_a
- Reynoldsovo číslo odvozené ze zákona hybnosti pro Power Law model, Re^+
- Reynoldsovo číslo založené na zředěné viskozitě, Re_s
- Reynoldsovo číslo založené na skutečné viskozitě, Re_{eff}

Nusseltovo podobnostní číslo

Nusseltovo číslo je bezrozměrná veličina vyjadřující poměr mezi konvekčním přestupem tepla v kapalinách a vedením tepla v pevných látkách. Vyjadřuje vliv proudění na tepelný tok stěnou. Nusseltovo číslo blízko 1 vyjadřuje laminární tok, větší čísla charakterizují turbulentní tok.

$$Nu = \frac{\alpha_k L}{\lambda} \quad (53)$$

α_k ... koeficient prostupu tepla

L ... délka kanálu

λ ... koeficient tepelné vodivosti

$Nu = f(Re, Pr, Fo)$

Pro laminární proudění v trubce lze například odvodit $Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4}$, za znaky podobnostních čísel se dosadí jejich tvar a dostaneme rovnici

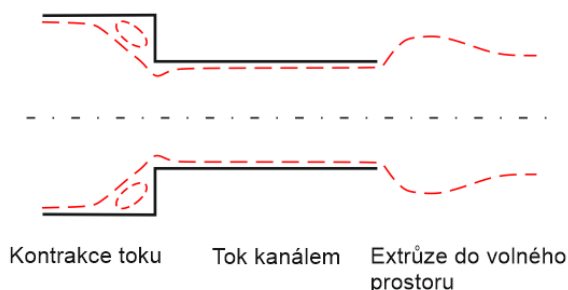
$\frac{\alpha_k L}{\lambda_r} = 0,023 \left(\frac{uL}{\lambda_r} \right)^{0,8} \left(\frac{v}{\alpha_k} \right)^{0,4}$. Většinou jsou hodnoty podobnostních čísel tabelovány.²¹

9 Matematické modelování viskoelastických kapalin

K popisu viskozity polymerních tavenin byly vytvořeny zjednodušené matematické modely popisující určitou část smykových rychlostí a platicích za určitých podmínek. Každý model je vhodný pro jinou oblast zpracování polymerů v závislosti na smykové rychlosti a požadavku přesnosti výpočtu.

Existuje několik CFD (computational fluid dynamics) programů umožňujících výpočet Newtonského a viskoelastického toku materiálu. Výpočty viskoelastického toku často vedou k nestabilitě výpočtu především u toků s vysokým Weissenbergovým a Deborovým číslem, proto jsou často v praktických aplikacích nahrazovány výpočtem Obecného Newtonského toku. To umožňuje výpočet i tvarově složitějších kanálů při vyšších smykových rychlostech s ne-izotermickým dějem, aniž by došlo k výrazným odchylkám od skutečnosti. Při výpočtu toku do volného prostoru se však bez výpočtu viskoelastických vlastností neobejdeme. Při tomto druhu toku nelze zanedbat rozdíl normálových napětí a elasticitu materiálu.

Při tečení taveniny do volného prostoru zvětšuje tavenina svůj objem v porovnání s průměrem kontrakce. Je to dáno viskoelastickou pamětí materiálu a dobou relaxace. Míra zvětšení souvisí s délkou kontrakce, u delší kontrakce má tavenina více času na uvedení se konformačních poloh s menší energií. Poměr mezi průměrem kapiláry a konečným průměrem D/D_0 roste s rostoucí smykovou rychlostí a klesá s rostoucí teplotou podobně jako smyková viskozita a normálové napětí N_1 .⁴¹



Obr. 39: Tok viskoelastické kapaliny přechodem a kontrakcí kanálu s výstupem do volného prostoru

Mnoho studií se již cca 40 let zabývá vstupem viskoelastické taveniny do kruhové kontrakce s poměrem až 20:1, např. práce Bagley a Birks⁶⁶, Boger a Walters⁶⁷. Při vstupu kapaliny do úzké kontrakce vzniká při určitých podmínkách víření kolem kontrakce. Většina studií se omezuje na popis rozdílu mezi lineárním a rozvětveným polyetylénem s různou smykovou rychlostí nebo roztoky.

V průmyslu využívané softwary (Moldflow, Cadmould, Moldex 3D, 3D Timon, C-Mold) využívají obecného Newtonského toku s proměnnou viskozitou $f = (\gamma, T)$, tepelnou výměnou a zohledňují fázové přeměny materiálu. Tyto programy zanedbávají viskoelastické vlastnosti a tok počítají pouze jako čistě viskózní objemový tok (GNF, VOF) s proměnnou viskozitou, fázovým modelem krystalizace a rovnicemi vedení tepla. Každý program využívá různých modelů viskózních křivek, viz kapitola 9.2. Výhodou takového výpočtu je jeho jednoduchost a stabilita výpočtu (lineární výpočet). Malá a pro praktické využití zanedbatelná, odchylka od skutečnosti při výpočtu tlaku, tepelné výměny, smykové rychlosti a průběhu plnění (geometrie). Nevýhodou je jejich menší flexibilita nastavení a zanedbání elasticity a normálového napětí.

Vedle toho existují CFD universální řešiče pro výpočet kapalin, které uživateli umožňují nastavit výpočtový model a popsat požadované vlastnosti viskoelastické kapaliny. Mezi takové řešiče patří ANSYS Fluent/ Polyflow, Lemma ANANAS, Comsol Multiphysics, Flow 3D, Phoenix, OpenFoam resp. CAELinux, který navíc umožňuje měnit zdrojový kód a není licencovaný.

9.1 Programy využívané pro průmyslové použití při vstřikování plastů

Numerické simulace pro technologii vstřikování využívají výpočtu konečných prvků a pracují na základě Navier-Stokes rovnic podle Obecného Newtonského modelu. Výpočet toku je závislý na čase, umožňuje vizualizaci objemového toku (VOF), neuvažuje elasticitu, umožňuje tepelnou výměnu a výpočet změn během přechodových teplot s chladnutím a krystalizací taveniny.

Jejich komerční využití začalo v devadesátých letech minulého století a spolu se stále výkonnějším hardwarem dnes umožňují rychlé a přesné výpočty plnění, chlazení, deformací, atd.

Konečné prvky pracují s tzv. výpočtovou sítí a rozlišujeme tři druhy sítě:

1. mid plane (2D)
2. dual domain (2,5D)
3. 3D mesh

„Mid plane“ je plošná síť pracující s dvourozměrným systémem, výhodou je velká rychlost výpočtu a možnost počítat plnění v případě, že máme pouze plochy modelu. Toho se s výhodou využívá v průběhu návrhu plastového dílu, kdy je v počáteční fázi k dispozici pouze tvarová plocha (Strak). Nevýhodou je méně přesný výpočet.

„Dual domain“ 2,5D již pracuje s objemovým modelem a má velice dobrý poměr rychlosti výpočtu k přesnosti výpočtu. Výpočet pracuje na principu Hele-Shaw modelu, což je zjednodušený výpočet tečení pro $h \ll L$. Síť je vytvořena pouze na povrchu modelu a software pomocí vlastního algoritmu je schopen dopočítat hodnoty tloušťkou stěny. Metoda se nehodí pro velké tloušťky stěny a i u malých vstřikovacích rychlostí se výsledky liší od přesnější 3D sítě. ^{6, 24, 23, 64}

Hele Shaw model

Rychlostní profil v ose z je počítán jako

$$u = \nabla p \frac{z^2 - H^2}{2\mu} \quad (54)$$

výpočet tlaku v ploše xy je počítán jako

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0 \quad (55)$$

3D síť je nejnáročnější na kvalitu CAD modelu a výkon počítače. Dává nejpresnější výsledky ze tří metod a umožňuje výpočet tenkostěnných i tlustostěnných modelů. Je velice vhodná pro výpočty plněných materiálů a výpočet deformací a smrštění. Umožňuje velice dobrou vizualizaci plnění, kde věrně kopíruje skutečný profil čela taveniny. S počtem elementů však exponenciálně roste náročnost výpočtu.

Mezi nejvýznamnější komerční softwary určených přímo pro technologii vstřikování patří Autodesk Moldflow (USA), Moldex3D (Coretech, Taiwan), Cadmould (Simcon, SRN), Transvalor Rem3D.

9.2 Matematické modely nahrazující tokové křivky a viskoelastické chování

9.2.1 Obecné Newtonské kapaliny (Generalized Newtonian fluids)

Tyto modely jsou široce používané v simulačních analýzách. Využívají Newtonských zákonů o kapalinách a nahrazují tokové křivky pomocí matematických modelů. Koeficienty obsažené v rovnicích se experimentálně získávají pomocí reometrů (v případě, že nejsou k dispozici z jiných zdrojů). Modely umí dobře spočítat tlakové pole a geometrii plnění, nelze jimi správně spočítat vnitřní pnutí, normálové napětí a změny při náhlé změně geometrie (dílu, vtoku, atd.).^{40, 41}

Power Law model (Mocninový zákon)

Tento model patří mezi nejjednodušší modelové výpočty a byl navržený Ostwaldem a de Waelem. Je založen na závislosti veličin $\ln \eta(\dot{\gamma})$ a $\ln (\dot{\gamma})$ a platí pro střední smykové rychlosti. Neuvažuje dočasnou stlačitelnost tekutiny a má nenormálový rozdíl hlavních napětí. Vhodnou aplikací tohoto modelu je vstřikování plastů.^{30, 54}

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (56)$$

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad (57)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}(\dot{\gamma} : \dot{\gamma})} \quad (58)$$

η_0 ... viskozita při nulové smykové rychlosti (Newtonská viskozita)

B ... index konzistence

T_b ... konstanta zohledňující vliv teploty na materiál

T ... přechodová teplota (T_g , T_m)

n ... Power Law index (viz. tab. 3)

Tab. 3: Power law index n ³⁰

ABS, PC, PMMA	0,25
PS, PVC, LDPE, PP	0,35
HDPE	0,5
PET	0,65
PA 66	0,75
Newtonská kapalina	1

K popisu vlivu teploty a tlaku na viskozitu při nulové smykové rychlosti se používají další modely.²⁸

Ellis model

Oproti Power Law modelu obsahuje Ellis model tři parametry, kde je viskozita funkcí absolutní hodnoty tensoru smykového napětí.^{30, 54}

$$\eta(\tau) = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_{1/2}} \right)^{\alpha-1}} \quad (59)$$

α ... udává úhel křivky

$\tau_{1/2}$... polovina nulové smykové viskozity

τ_0 ... nulová smyková viskozita

Cross Model

Jeden z nejběžnějších modelů, na kterém pracují dnešní simulační programy analýzy tečení. Zlepšuje Power law model a pracuje v téměř celém rozsahu smykových rychlostí. Umožňuje tak výpočet fáze plnění i dotlaku při vstřikování plastů.

$$\eta(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{\eta_0 T_1}{1 + \left(\frac{\eta_0(T)}{\tau_*} \dot{\gamma} \right)^{n-1}} \quad (60)$$

n ... Power law index

τ^* ... kritické napětí

Podobně jako Power Law model, Cross model využívá korekce závislosti teploty na viskozitě Arrhenius nebo Cross-WLF.^{11, 30, 54}

Carreau model

Je používán pro popis průběhu viskozity při nízkých smykových rychlostech.

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \left(1 + \lambda_r^2 \dot{\gamma}^2 \right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (61)$$

η_{∞} ... nekonečná viskozita

η_0 ... nulová viskozita

λ_r ... čas relaxace

n ... Power law index

Carreau-Yasuda model

Platí pro širší škálu smykové rychlosti s platností v oblastech Newtonských kapalin i viskózního smyku. podobně jako Power law model neuvažuje dočasnou elasticitu kapaliny. Při nízkých smykových rychlostech se chová jako Newtonská kapalina při středních smykových rychlostech má podobu Power law modelu.^{30, 54}

$$\eta = H(T) \left[\eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + \dot{\gamma}^2 \lambda_r^2)^{(n-1)/2} \right] \quad (62)$$

η_0, η_{∞} ... nulová a nekonečná viskozita

$H(T)$... referenční teplota

9.2.2 Modely viskoelastického chování roztoků a tavenin polymerů

Modely obecných Newtonských kapalin popisují závislost viskozity na smykové rychlosti, ale již neberou v úvahu další typické viskoelastické chování polymerů jako je elasticita, relaxace, v souvislosti s tím např. zvětšování objemu při toku do volného prostoru při vytlačování, atd. Napětí viskoelastických látek nezáleží pouze na okamžitých podmínkách, ale i na podmínkách, kterými materiál prošel v minulosti.

K popisu tohoto viskoelastického chování se používá několik modelů, které se od sebe liší složitostí a přesností viskoelastického chování.

Mechanický model Maxwella a Kelvina (Voight), který je charakterizován pružinou a tlumičem a při znalostech základní mechaniky umožňuje snadné pochopení viskoelastického chování. Pružina znázorňuje elastické chování a platí zde Hookův zákon. Tlumič znázorňuje viskózní chování a platí zde Newtonův zákon a představuje trvalou deformaci materiálu. Kombinací tlumiče a pružiny v různém uspořádání dostaneme viskoelastické chování.^{9,}

^{10, 38, 41}

Maxwellův model

Podle tohoto modelu se chovají látky jako je dehet a pryskyřice. Model je definován pružinou zapojenou do série s tlumičem a znázorňuje elastickou a trvalou deformaci.

$$\sigma = \sigma_v = \sigma_e \quad (63)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_v + \varepsilon_e \quad (64)$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}$$

$$\dot{\varepsilon} + \varepsilon_e = \frac{\dot{\sigma}}{G} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (65)$$

po úpravě dostaneme rovnici aplikovatelnou na Maxwellův model

$$G \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{G} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (66)$$

$$\tau_{el} = \tau_{visk} \quad (67)$$

$$\gamma = \gamma_{el} + \gamma_{visk} \quad (68)$$

$$\gamma(t) = \frac{\tau}{G} + \frac{\tau}{\mu} t \quad (69)$$

k ... modul tuhosti pružiny (materiálová konstanta definující vlastnosti materiálu)

μ ... viskozita tlumiče (závisí na materiálu)

Kelvin - Voigt model

Model je definován pružinou a tlumičem v paralelním zapojení a znázorňuje zpožděně elastické chování

$$\gamma_{el} = \gamma_{visk} \quad (70)$$

$$\tau = \tau_{el} + \tau_{visk} \quad (71)$$

$$\tau = \gamma G + \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (72)$$

po separaci proměnných rovnice (72) a následné integraci rovnice dostaneme po úpravě

$$\gamma(t) = \frac{\tau}{G} \left(1 - e^{-\frac{G}{\mu} t} \right) \quad (73)$$

Reologické chování reálných viskoelastických kapalin je dobře representováno více nebo méně komplexními kombinacemi obou modelů.

Mezi ně patří i Tucketův model, který vznikl kombinací Maxwellova a Kelvinova modelu. Tucketův model jednoduše popisuje viskoelastické chování polymerů a jejich komplikovanou strukturou. Deformace zahrnuje

elastickou složku, plastickou složku a deformaci zpožděně elastickou v závislosti na době působení vnějšího napětí.^{30, 54}

Tucketův model

Tento model může být použit pro popis chování lineárního amorfního polymeru

$$\gamma(t) = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left(1 - e^{-\frac{G_2}{\mu_2} t}\right) + \frac{\tau}{\mu_3} t \quad (74)$$

pokud platí: $G_1 = G_2$ a $\mu_1 = \mu_2$

$$\gamma(t) = \frac{\tau}{G} \left(2 - e^{-\frac{G}{\mu} t}\right) + \frac{\tau}{\mu} t \quad (75)$$

Oldroyd-B

Nejjednodušší model podobný Maxwellovu. Počítá s konstantní viskozitou a kvadratickou závislostí normálových napětí. Hodí se pro výpočty, kdy nejsou známy přesné vlastnosti kapaliny.^{30, 54}

$$\frac{\partial \tau_p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \tau_p - (\nabla \mathbf{u}) \tau_p - \tau_p (\nabla \mathbf{u})^T = -\frac{1}{\lambda_r} \tau_p + \frac{\eta}{\lambda_r} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (76)$$

η ... viskozita polymeru

λ_r ... čas relaxace

White - Metzner model

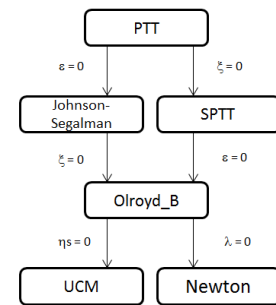
Model vychází z Upper Convected Maxwell modelu. Zohledňuje závislost viskozity na smykové rychlosti, dobu relaxace a ne-kvadratickou závislost normálových napětí. Model je vhodný pro rychlý časově závislý pohyb. Viskozita i doba relaxace jsou obě funkcí teploty a smykové rychlosti. Doba relaxace je v tomto případě definována jako poměr viskozity a smykového modulu pružnosti.^{30, 54}

$$\tau + \lambda_r(T, \dot{\gamma}) \left[\frac{\partial \tau}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \tau - \nabla \mathbf{u}^T \cdot \tau - \tau \cdot \nabla \mathbf{u} \right] = \eta(T, \dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (77)$$

$$\lambda_r(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta(T, \dot{\gamma})}{G} \quad (78)$$

Phan-Thien-Tanner (exponenciální PTT model)

Je jedním z nejpoužívanějších modelů pro popis viskoelastického toku polymerních tavenin. Je založen na interpolaci čistě viskózního a čistě elastického chování. Popisuje dloužení makromolekul. Zohledňuje závislost viskozity na smykové rychlosti, dobu relaxace a ne-kvadratickou závislost normálových napětí při vysoké smykové rychlosti.^{30, 38, 54}



Obr. 40: Rozdělení PTT modelu při nulových koeficientech.⁴⁹

$$\exp \left[\frac{\varepsilon \lambda_r}{\eta_1} (T_1) \right] \cdot T_1 + \lambda_1 \left[\left(1 - \frac{\xi}{2} \right) \check{T}_1 + \frac{\xi}{2} \hat{T}_1 \right] = 2\eta_1 D \quad (79)$$

$$\check{T}_1 = \frac{DT_1}{Dt} - T_1 \cdot \nabla v - \nabla v^T \cdot T_1 \quad (80)$$

$$\hat{T}_1 = \frac{DT_1}{Dt} + \nabla v^T \cdot T_1 + T_1 \cdot \nabla v \quad (81)$$

\check{T}_1 ... je horní konvekční derivace času složky tensoru napětí T_1

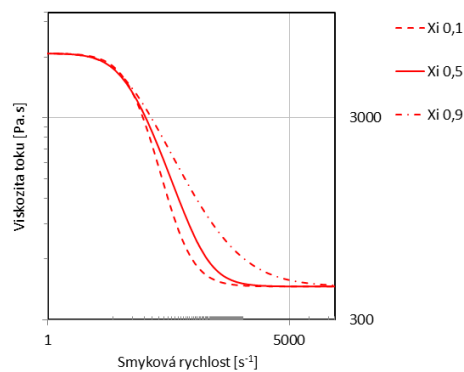
\hat{T}_1 ... je dolní konvekční derivace času složky tensoru napětí T_1

ξ ... materiálová konstanta znázorňující vzájemný pohyb molekul a ovlivňující smykovou viskozitu

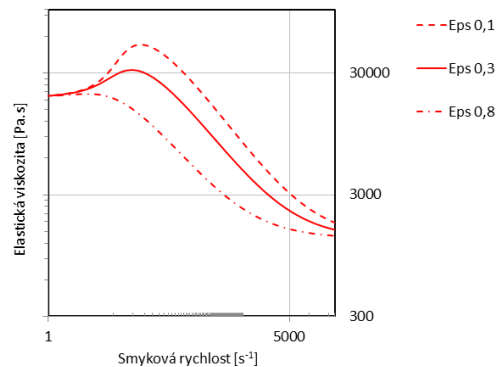
ε ... materiálová konstanta ovlivňující elastickou viskozitu. Při vysokých hodnotách kolem 0,5 nedochází ke zpevňování materiálu během dloužení.⁴⁹

$$\frac{N_2(\dot{\gamma})}{N_1(\dot{\gamma})} = -\frac{\xi}{2} \quad (82)$$

Z výsledků měření smykové a tahové viskozity (Larson⁴⁵, Verbeeten⁴⁶) vychází např. pro LDPE $\xi = 0,2$, podle (Schweizer⁴⁸) vychází $\xi = 0,4$ pro rozvětvené polymery a $\xi = 0,6$ pro lineární polymery. Pivokoňský⁵¹ udává $\xi = 0,2$ pro LLDPE a $\xi = 0,7$ pro HDPE. Teoreticky maximálně nabývá hodnot mezi 0 až 2.



Obr. 42: Rozdělení PTT modelu při nulových koeficientech



Obr. 41: Rozdělení PTT modelu při nulových koeficientech

Giesekus model

Jeden z nejreálnějších modelů v celém rozsahu smykové rychlosti, počítá nekvadratický rozdíl normálových napětí v oblasti vysoké smykové rychlosti. Nehodí se pro aplikace s normálovým tokem materiálu (dloužení), protože elastická viskozita neklesá v závislosti na smykové rychlosti. U Giesekus modelu se složka T_1 vypočítá z rovnice 83.^{30, 38, 54}

$$\left(I + \frac{\alpha \lambda_r}{\eta_1} T_1\right) \cdot T_1 + \lambda_{r1} \check{T}_1 = 2\eta_1 D \quad (83)$$

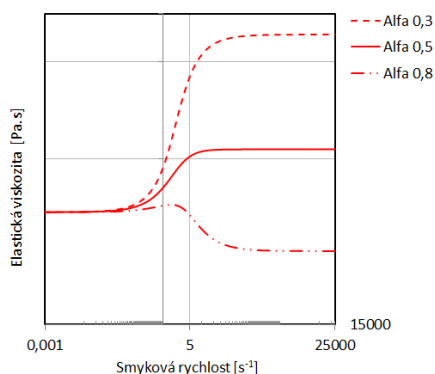
$$\check{T}_1 = \frac{DT_1}{Dt} - T_1 \cdot \nabla V - \nabla V^T \cdot T_1 \quad (84)$$

I ... jednotkový tensor

α ... materiálová konstanta $<0..1>$, nenulová hodnota ovlivňuje vázanost poměrného prodloužení a dynamické viskozity. $\alpha = 1$ platí pro Newtonské kapaliny, $\alpha = 0$ platí pro elastický tok.

\check{T}_1 ... je horní konvekční derivace času složky tensoru napětí T_1

$\lambda_{r1} \check{T}_1$... určuje elasticitu a zpožděnou deformaci


Obr. 43: Tahová viskozita v závislosti na smykové rychlosti (prodloužení) při koeficientech $\alpha=0,3/0,5/0,8$

9.2.3 Modely zohledňující vnitřní strukturu materiálu

FENE-P

Vychází z molekulové teorie a podobá se Maxwellovu modelu, tento model obsahuje pružinu s přesně definovaným zdvihem mezi dvěma závažími ponořenými do roztoku o dané viskozitě. Tento model je schopen simulovat dloužení a hodí se pro zředěné roztoky.

POM-POM a eXtended POM-POM (XPP) model

Tento model navrhli McLeish a Larson. Model simuluje chování rozvětvených makromolekul. Principiálně je model založen na rovnicích popisujících orientaci makromolekul a míru dloužení v závislosti na orientaci. Verbeeten tento model použil při výpočtu obtékání díry taveniny LDPE a porovnává jej s reálnými hodnotami a dalšími viskoelastickými modely.⁵⁰

Leonov model

Model byl vytvořen za účelem popisu chování plněných elastomerů částice karbonu a částice silikátu. Simuluje chování fixovaných a volných řetězců, u kterých se vlivem deformace oslabují van de Waalsovy síly a řetězce se uvolňují.^{30, 54}

9.3 Matematické modely nahrazující termodynamické vztahy

Výpočet viskozity v závislosti na teplotě je podle tvaru:

$$\eta = H(T)\eta_0(\dot{\gamma}) \quad (85)$$

$H(T)$... je Arrhenius, WLF nebo Tait zákon

Arrhenius zákon

$$H(T) = \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T-T_0} - \frac{1}{T_\alpha-T_0} \right) \right] \quad (86)$$

α ... poměr aktivační energie k termodynamické konstantě

T_α ... teplota, při které $H(T) = 1$

T_0 ... minimální relativní teplota

WLF zákon

Williams-Landel-Ferry rovnice je teplotně závislá viskozita, která lépe odpovídá experimentálním datům než Arrhenius zákon pro širokou škálu teploty, především se hodí pro oblast skelného přechodu.^{24, 64}

$$\ln(H(T)) = \frac{c_1(T_r - T_a)}{c_2 + T_r - T_a} - \frac{c_1(T - T_a)}{c_2 + T - T_a} \quad (87)$$

c_1 , c_2 jsou WLF konstanty a T_r a T_a jsou referenční teploty

Tait model

Tento model je schopen popsat amorfní i semikrystalický materiál s charakteristickými změnami přechodových teplot. Model využívá např. Moldflow i Cadmould.^{24, 64}

10 Numerický výpočet toku

K určení reologických dějů uvnitř obou vtoků byl použit GNF a PTT model umožňující výpočet čistě viskózních i viskoelastických kapalin. Pomocí zjednodušeného numerického modelu lze získat průběhy veličin, které nelze experimentálně určit. Srovnáním izotermického a ne-izotermického výpočtu byl odhadnut vliv teploty na tok kapaliny. Izotermický výpočet zjednodušuje výpočet a lze jím vypočítat tok viskoelastické kapaliny s vysokým Weissenbergovým číslem, aniž by docházelo k nestabilitě výpočtu. Porovnáním obou vtoků lze určit jejich vlastnosti, aniž bychom použili reálné podmínky vstřikování.

Výpočet fyzikálních dějů uvnitř obou vtoků byl částečně proveden v softwaru Moldflow a z větší části v softwaru Ansys Polyflow. Ansys umožňuje širší zadání okrajových podmínek a umožňuje lépe kontrolovat vlastní výpočet. Software Moldflow byl zvolen pro kontrolu základních hodnot získaných měření. Tento software, díky jeho dobré databázi materiálů, umožňuje přesně vypočítat chování komerčních materiálů použitých v technologii vstřikování. Nevýhodou však je uzavřené prostředí a výpočtový mechanismus pracující pouze na principu Obecného Newtonova modelu s průběhem viskozity podle Cross WLF modelu. Tento model je vhodný pro široké spektrum smykových rychlostí a dokáže pokrýt celý proces vstřikování, více v kapitole 10.1.

K určení tensoru napětí a tepelné bilance byl zvolen software Ansys, umožňující výpočet izotermického i ne-izotermického děje viskoelastické látky. Izotermický model byl použit také k výpočtu toku viskoelastické taveniny. V případě výpočtu izotermického děje se zanedbáním elastičnosti vystačíme s momentovou rovnicí a rovnicí hybnosti pro nestlačitelné kapaliny.

Do pohybové rovnice je třeba doplnit koeficient viskozity závislý na smykové rychlosti. Tím dostaneme tzv. Obecný Newtonův model, pomocí kterého lze spočítat chování toku taveniny polymeru se zanedbáním elastičnosti a rozdílu normálových napětí. Abychom současně získali elastickou složku, je třeba model rozšířit o členy simulující elasticitu.

Tavenina polymerů je za normálních podmínek viskoelastická, dochází k trvalým i dočasným deformacím. Zanedbáním elastické části dostaneme výsledky, které u čistě viskoelastického chování nastanou, ale nezískáme konečnou hodnotu např. napětí po odeznění elastického napětí taveniny.

Část disertační práce se zaměřuje na reologické a napěťové podmínky v oblasti ústí vtoku upravené geometrie a filmového vtoku při podmínkách vstřikování.

10.1 Tepelná výměna

Teplota taveniny při laminárním toku je ovlivněna fontánovým tokem, kdy dochází k mísení taveniny, přestupem tepla mezi stěnou formy a horkou taveninou a třecím teplem vznikajícím v okrajové vrstvě. Teplotní profil proudící taveniny v dutině formy lze u tenkostěnných výrobků měřit obtížně. Simulační analýzy dokáží relativně přesně a snadno průběh teploty spočítat v celém průběhu procesu vstřikování.

Teplotní profil má při malých rychlostech největší teplotu v jádru toku, při zvýšení vstřikovací rychlosti dochází vlivem tření v okrajových vrstvách k nárůstu teploty s extrémem poblíž stěny formy (obr. 52). Při vyšších smykových rychlostech, tzn. ve fázi vstřikování, nedochází ani po delší době k úplnému zamrznutí vtoku. Zamrzlá vrstva roste pouze do doby, než se teplo odebrané stěnou formy vyrovná s teplem dodaným taveninou a vnitřním třením (frikční) vazké proudící taveniny polymeru. Ve fázi dotlaku, kdy se kompenzuje smršťování taveniny a smyková rychlost je nízká, dochází

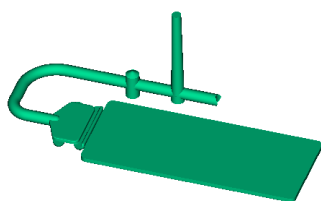
k úplnému zamrznutí. Jediný zdroj tepla je postupně dodávaná tavenina. Doba, po kterou je vtokový systém schopný kompenzovat smrštění, je závislá jednak na tepelné bilanci teploty taveniny a množství odebraného tepla a jednak na dimenzování (konstrukci) vtokového ústí.

Simulace

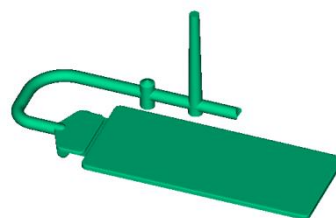
Pro analýzu v Moldflow byl použit materiál Pulse A35-110 (PC/ABS) a u obou vtoků byly voleny stejné okrajové podmínky.

Okrajové podmínky simulace v Autodesk Moldflow

Materiál PC/ABS Pulse A35-110, Cross WLF, 3D mesh, $T_i = 270^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, absolute ram speed profile, Počet elementů: modifikovaný vtok – 516832 elementů, filmový vtok – 478048.

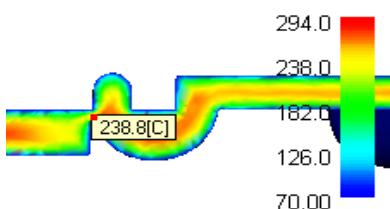


Obr. 45: STL model vtoku s modifikovanou geometrií ústí

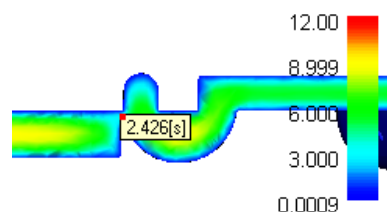


Obr. 44: STL model filmového vtoku

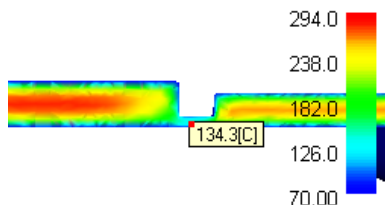
Z výsledků numerického výpočtu lze odvodit, že modifikovaný vtok si již v průběhu tečení udržuje vyšší teplotu v oblasti ústí vtoku. Ústí modifikovaného vtoku zamrzá později než ústí filmového vtoku. Modifikovaný vtok po 2,4s zatímco filmový vtok již po 1,4s. Velikost ústí vtoku je pro obě varianty stejná. Patrná konstrukční odlišnost, popsaná v kapitole 4, modifikovaného vtoku umožňuje na rozdíl od filmového vtoku lépe izolovat ústí vtoku od relativně studené stěny formy.



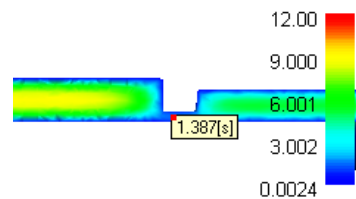
Obr. 46: Teplotní pole upraveného vtoku pro PC/ABS v čase 1,4s (fáze dotyku).



Obr. 47: Doba zamrznutí taveniny pro PC/ABS, vstřík. Pokles teploty na hodnotu $T_g = 140^\circ\text{C}$ při tlaku cca. 0MPa



Obr. 48: Teplotní pole filmového vtoku pro PC/ABS v čase 1,4s. (fáze dotlaku)



Obr. 49: Doba zamrznutí taveniny pro PC/ABS, vstřik. Pokles teploty na hodnotu $T_g = 140^\circ\text{C}$ při tlaku cca. 0MPa

Moldflow dává dobře tušit tepelnou výměnu mezi taveninou a stěnou formy, ale neumožňuje zjistit množství frikčního tepla uvolněného během toku. Za tímto účelem byl proveden 2D ne-izotermický výpočet ustáleného toku v softwaru Ansys Polyflow. Vzhledem k jeho omezené databázi materiálu potřebné pro určení koeficientů tokových a teplotních křivek, byl použit amorfní materiál PC. Pro výpočet bylo zvoleno několik rychlostí tečení a bylo tak možné pozorovat závislost frikčního tepla na rychlosti tečení.

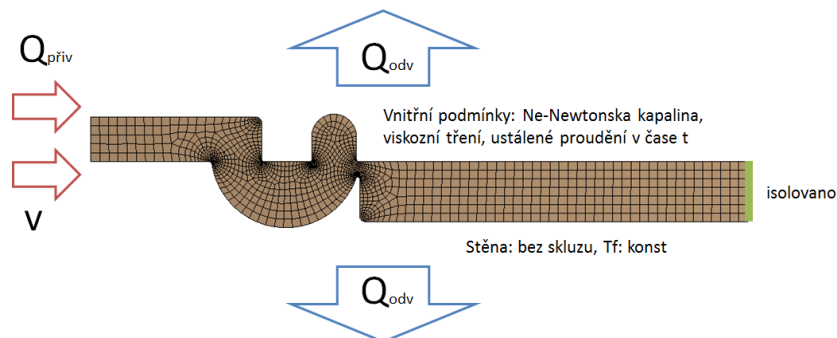
Ustálený (steady state) výpočtový model znamená kontinuální tok kanálem, prakticky si ho lze představit jako stálé vtlačování taveniny do kanálu po nekonečně dlouhou dobu. V čase t_0 má celý objem kanálu (taveniny) teplotu T_t a stěna kanálu teplotu T_f , po určité době od t_0 dochází ke změně teploty až do vyrovnání přivedeného a odvedeného tepla a teplota se dále nemění. V reálných podmínkách tato stabilita nikdy zcela nenastane.

V prvotní fázi plnění dochází k procesu ustálení teplot a poté je proces limitován vstřikovacím tlakem. Jak bude vstřikovací proces vypadat, záleží na konstrukci vtokového systému, konstrukci chlazení formy, konstrukci dílu, vstřikovacích parametrech atd.

Pro určení místa s největším frikčním teplem a srovnání obou vtoků je zjednodušený numerický výpočet postačující. Ve 2D modelu lze pozorovat změny způsobené specifickou geometrií obou vtoků a zároveň ušetřit výpočetní čas.

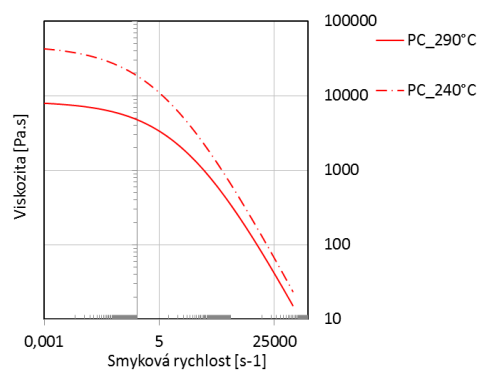
Okrajové podmínky simulace v Ansys Polyflow

Výpočtový model: 2D výpočtová síť s 5tis elementy



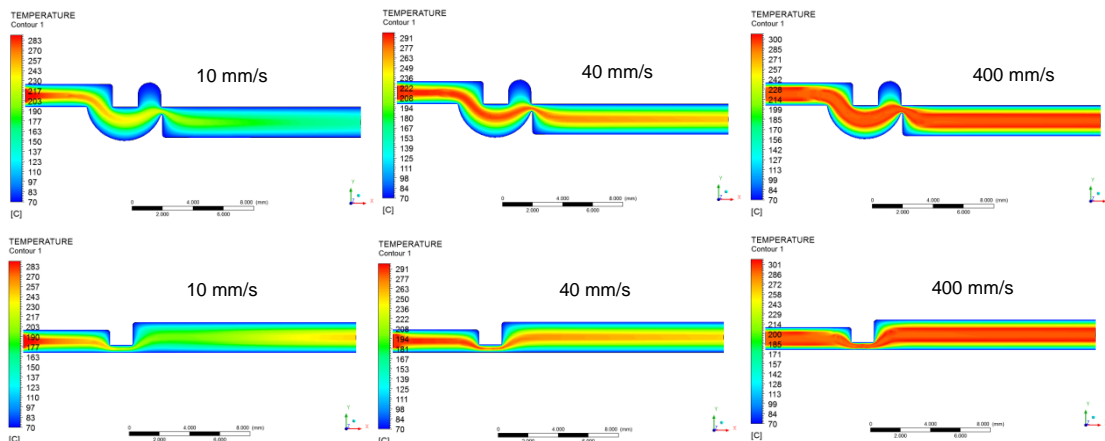
Obr. 50: Model modifikované geometrie vtoku s okrajovými podmínkami a tepelnou bilancí

Materiál PC_nonisothermal,
Generalized Newtonian non-isothermal
flow problem, funkce = viskozita model
(shear rate) – Carreau-Yasudda law,
funkce = viskozita (teplota) model –
Arrhenius shear stress law, rychlost
toku = a) 10 mm/s, b) 40 mm/s, c) 100
mm/s, d) 400 mm/s (v), teplota taveniny
290°C ($Q_{př}$), teplota formy 70°C (Q_{odv}),



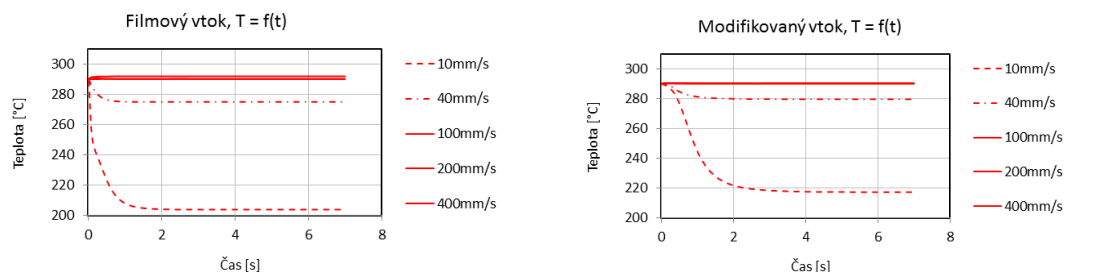
Obr. 51: Viskozní křivka Carreau-Yasudda pro PC
při $T_{t1} = 290^\circ\text{C}$ a $T_{t2} = 240^\circ\text{C}$. $\lambda_r = 0,2589$, $n = 0,343$,
 $\eta_0 = 85490 \text{ Pa.s}$, $\eta_\infty = 0 \text{ Pa.s}$

Průběh teploty taveniny ustáleného toku koresponduje s objemovým výpočtem v Moldflow. Podle okrajových podmínek má stěna konstantní teplotu a v závislosti na rychlosti toku získává jádro různou teplotu. Při nižších rychlostech toku dochází po nějaké době k ochlazení taveniny. Modifikovaný vtok si udržuje ustálenou teplotu 220°C při počáteční rychlosti toku 10 mm/s, filmový vtok si udržuje teplotu o 20°C nižší při stejné rychlosti. Se zvyšující se rychlostí toku se tento rozdíl již snižuje. V praxi to může znamenat, že modifikovaný vtok umožňuje snadnější plnění malými rychlostmi toku, kdy nedochází k výraznějšímu vzniku třecího tepla s delší dobou dotlaku. Tuto domněnku je nutné dále ověřit měřením a výpočtem napětí.

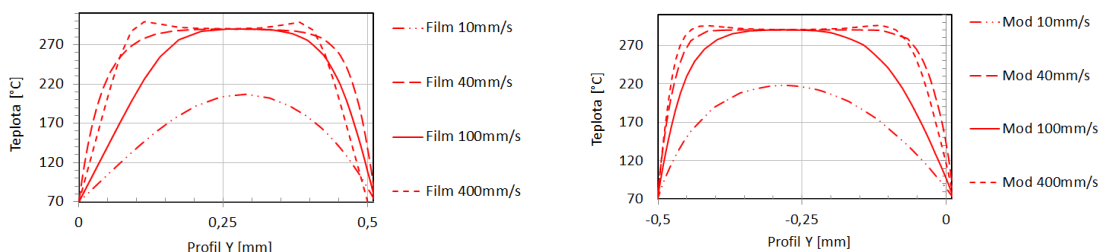


Obr. 52: Teplotní pole modifikovaného vtoku (nahore) a filmového vtoku (dole) při vstupní rychlosti 10 mm/s, 40 mm/s, 400 mm/s.

Teplota jádra klesá s poklesem rychlosti toku. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc.



Obr. 53: Průběh ustálení teploty jádra v oblasti ústí vtoku z počátečních hodnot daných okrajovými podmínkami výpočtu. Průběh je počítán pro rychlosti 10, 40, 100, 200, 400 mm/s. K největšímu poklesu teplot dochází při nízkých rychlostech. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc.



Obr. 54: Průběh teploty kanálem v oblasti ústí vtoku pro modifikovaný (Mod) a filmový (Film) vtok při rychlostech plnění 10, 40, 100, 400 mm/s. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc.

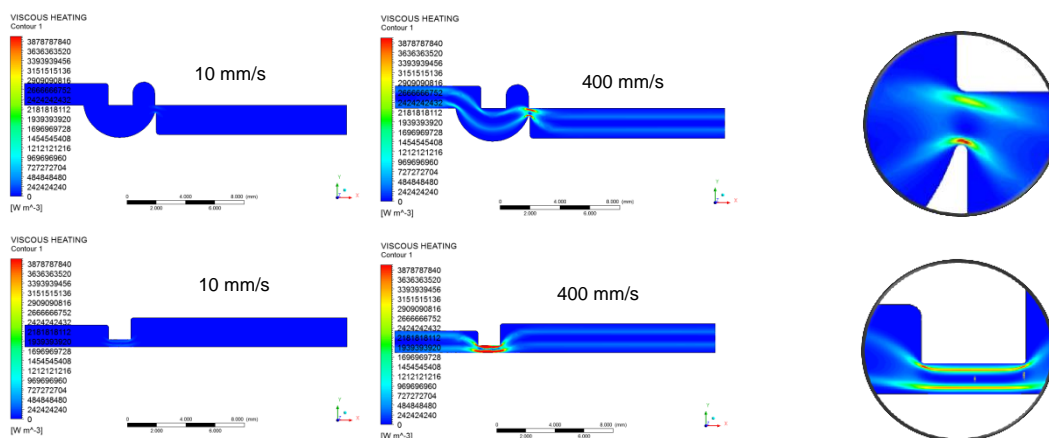
Průběh ustálené teploty kanálem znázorněný na obr. 54 má tvar paraboly a maximální velikost teploty se mění v závislosti na vstupní rychlosti toku. Při rychlosti cca 100 mm/s dosahuje teplota počáteční teploty taveniny. V tuto chvíli dochází k vyrovnání odvedeného tepla a tepla vzniklého třením (pohybem). Při zvyšující se rychlosti dochází k nárůstu teploty v okrajové části, aniž by došlo k nárůstu teploty jádra.

Viskozita kapalin je její vnitřní odpor, resp. vnitřní tření jednotlivých makromolekul a při smykovém tření dochází k uvolňování tepelné energie,

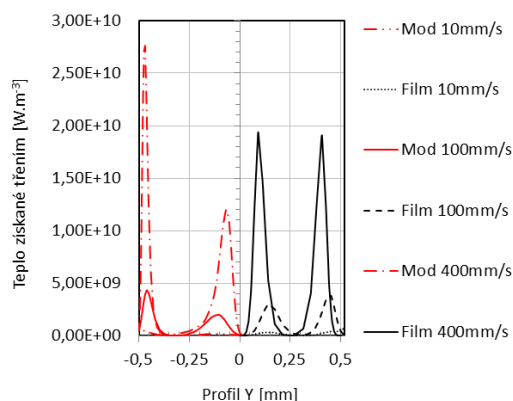
která vzniká mechanickým pohybem makromolekul. Uvolněné teplo zvyšuje lokálně teplotu a snižuje viskozitu. Pro teplo získané třecími silami platí rovnice (88), která odpovídá výpočtu smykového napětí.

$$Q_{\text{tření}} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (88)$$

μ ... viskozita



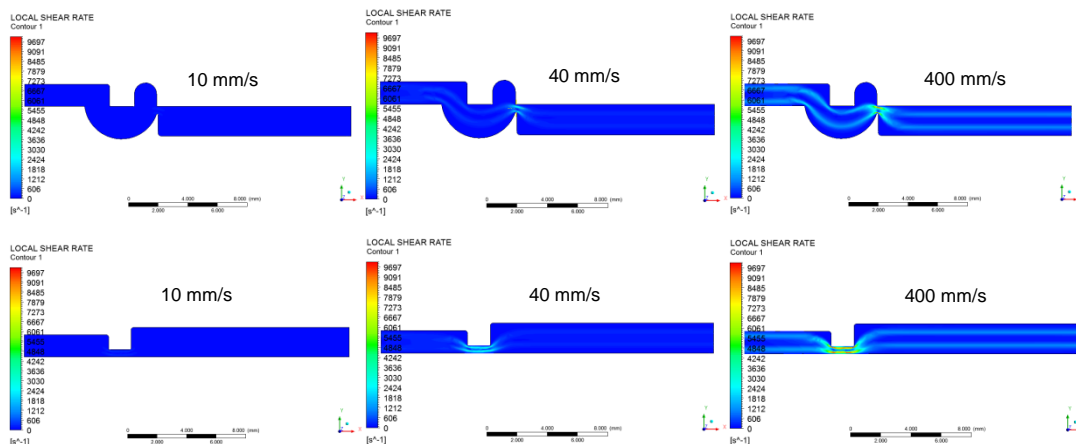
Obr. 55: Teplotní pole získané třením pro modifikovaný a filmový vtok při rychlostech plnění 10 mm/s a 400 mm/s. Vpravo detail ústí vtoku. Objem tepla získaného třením je větší u filmového vtoku. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc.



Obr. 56: Profil třecího tepla pro modifikovaný vtok (Mod) a filmový vtok (Film) při rychlostech plnění 10, 100, 400 mm/s. Nejvyšší teplotní špičku má modifikovaný vtok v oblasti ostrého rádiu. Velikost třecího tepla dosahuje svého maxima při rychlosti plnění 400 mm/s. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc.

Třecí teplo koreponduje se smykovou rychlostí. K tření dochází převážně v povrchové vrstvě mezi zamrzlou vrstvou a tekoucím jádrem. Lze pozorovat, že se zvyšující se rychlostí toku nebo se zmenšením průřezu dochází k nárůstu třecího tepla. Oba vtoky vykazují největší frikční teplo v oblasti ústí vtoku v místě ostrých přechodů. Teplota uvnitř jádra může dosáhnout maximálně teploty získané již při vstupu do kanálu, protože teplo získané třením souvisí se smykovou rychlostí, která je prakticky nulová na vrcholu

rychlostního profilu resp. uprostřed jádra. V oblasti ostrého rádiusu modifikovaného vtoku dochází k většímu nárůstu třecího tepla.



Obr. 57: Smyková rychlost pro modifikovaný a filmový vtok při rychlostech plnění 10, 100 a 400 mm/s. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc.

Zkouška doby působení dotlaku

K potvrzení výsledků získaných numerickou analýzou byla provedena zkouška doby zamrznutí ústí vtoku pro semikrystalický PP Mosten a amorfní PC/ABS Pulse A35-110. Princip spočíval v postupném zvyšování času dotlaku a následném vážení zkušební vzorku. K zamrznutí ústí vtoku došlo v době, kdy se již váha zkušební vzorku nezvyšovala. Pro vstřikování byla použita zkušební forma podrobněji popsaná v další kapitole 13.1.

Parametry nastavení byly pro oba vtoky stejné a byly voleny vzhledem k druhu vstřikovaného materiálu. Vážení proběhlo na přesných vahách s chybou měření 0,001g. Nejistota měření (chyba přístroje) u_b se tak podle vzorce (89) rovná:

$$u_b = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,0006 \quad (89)$$

Při konstantní době dotlaku bylo provedeno vždy pět měření $n = 5$. Vypočítanou chybu je tak třeba vynásobit korekčním koeficientem opakovaných měření 1,4. Nejistota měření u_c je vypočítána dle vzorce (108) a standartní rozšířená nejistota U s pravděpodobnostní chyby 95 % dle vzorce (109).



Tab. 4: Hmotnost vzorku, PC/ABS – Filmový vtok

Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$	Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$	Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$
0,001	4,557	4,570	0,044	0,4	5,214	5,212	0,022	0,8	5,363	5,356	0,026
	4,631				5,198				5,315		
	4,56				5,187				5,365		
	4,579				5,223				5,378		
	4,523				5,239				5,357		
0,1	4,9	4,863	0,036	0,5	5,274	5,257	0,03	0,9	5,361	5,373	0,016
	4,85				5,246				5,361		
	4,895				5,27				5,395		
	4,825				5,279				5,378		
	4,847				5,214				5,369		
0,2	5,034	5,026	0,01	0,6	5,314	5,321	0,03	1	5,393	5,376	0,014
	5,026				5,329				5,361		
	5,018				5,289				5,369		
	5,036				5,36				5,38		
	5,015				5,314				5,378		
0,3	5,121	5,133	0,036	0,7	5,36	5,352	0,032	4	5,419	5,407	0,018
	5,093				5,326				5,395		
	5,127				5,35				5,4		
	5,146				5,328				5,428		
	5,178				5,396				5,394		

Tab. 5: Hmotnost vzorku, PC/ABS – Modifikovaný vtok

Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$	Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$	Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$
0,001	4,572	4,561	0,042	0,7	5,76	5,729	0,022	1,7	6,048	6,040	0,028
	4,495				5,713				6,07		
	4,579				5,71				6,048		
	4,574				5,736				6		
	4,586				5,727				6,036		
0,1	4,866	4,899	0,026	0,8	5,779	5,771	0,032	1,8	6,058	6,062	0,018
	4,926				5,8				6,077		
	4,9				5,735				6,035		
	4,911				5,796				6,071		
	4,891				5,746				6,069		
0,2	5,092	5,089	0,02	0,9	5,896	5,839	0,036	1,9	6,078	6,065	0,028
	5,119				5,821				6,09		
	5,077				5,824				6,08		
	5,081				5,836				6,03		
	5,076				5,818				6,045		
0,3	5,248	5,250	0,014	1	5,889	5,887	0,01	2	6,078	6,099	0,052
	5,247				5,88				6,138		
	5,27				5,896				6,039		
	5,249				5,874				6,085		
	5,234				5,894				6,153		



0,4	5,412	5,390	0,018	1,1	5,922	5,925	0,024	2,5	6,127	6,130	0,02
	5,367				5,904				6,115		
	5,393				5,96				6,118		
	5,386				5,923				6,159		
	5,391				5,914				6,129		
0,5	5,479	5,507	0,02	1,3	5,984	5,986	0,006	3	5,802	6,064	0,164
	5,525				5,986				6,141		
	5,513				5,994				6,117		
	5,518				5,987				6,131		
	5,501				5,978				6,128		
0,6	5,611	5,606	0,044	1,5	6,024	6,009	0,024	4	6,136	6,131	0,03
	5,669				6,012				6,098		
	5,56				6,022				6,157		
	5,589				5,971				6,11		
	5,601				6,014				6,153		

Tab. 6: Hmotnost vzorku, PP Mosten – Filmový vtok

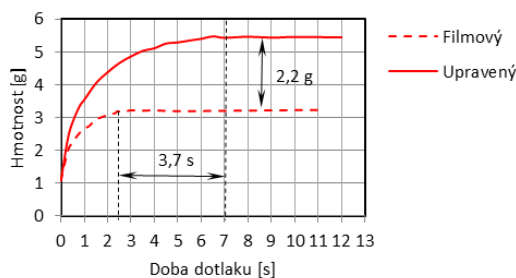
Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$	Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$	Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$
0,001	1,066	1,084	0,038	1,5	2,913	2,924	0,014	3	3,192	3,224	0,024
	1,044				2,944				3,219		
	1,130				2,928				3,227		
	1,076				2,923				3,246		
	1,103				2,914				3,236		
0,3	2,025	1,975	0,038	2	3,046	3,070	0,018	3,5	3,188	3,217	0,042
	1,955				3,075				3,205		
	1,979				3,091				3,208		
	1,981				3,069				3,201		
	1,934				3,071				3,284		
0,5	2,249	2,252	0,022	2,3	3,101	3,130	0,02	4	3,261	3,190	0,052
	2,242				3,133				3,198		
	2,237				3,130				3,188		
	2,246				3,149				3,176		
	2,287				3,136				3,127		
0,8	2,521	2,533	0,13	2,4	3,166	3,313	0,32	5	3,202	3,190	0,02
	2,530				3,191				3,162		
	2,529				3,184				3,200		
	2,369				3,179				3,200		
	2,714				3,843				3,185		
1	2,694	2,656	0,044	2,5	3,200	3,171	0,026	12	3,200	3,240	0,032
	2,613				3,146				3,230		
	2,675				3,184				3,246		
	2,614				3,176				3,241		
	2,682				3,149				3,282		
1,2	2,742	2,735	0,008	2,7	3,225	3,191	0,056				
	2,732				3,170						



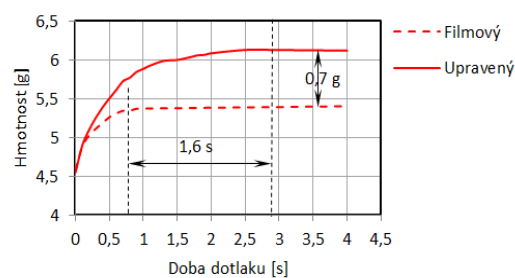
2,723				3,119			
2,736				3,248			
2,740				3,193			

Tab. 7: Hmotnost vzorku, PP Mosten – Modifikovaný vtok

Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$	Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$	Doba dotlaku [s]	Hmotnost [g]	μ	$\pm U$
0,001	1,115	1,072	0,04	2,5	4,681	4,657	0,022	6	5,417	5,395	0,034
	1,075				4,649				5,405		
	1,019				4,644				5,361		
	1,084				4,636				5,427		
	1,069				4,675				5,364		
0,3	2,394	2,364	0,022	3	4,848	4,864	0,012	6,5	5,511	5,464	0,038
	2,363				4,873				5,451		
	2,346				4,858				5,440		
	2,347				4,869				5,487		
	2,369				4,874				5,432		
0,5	2,914	2,848	0,042	3,5	5,020	5,026	0,02	7	5,448	5,425	0,02
	2,828				5,008				5,421		
	2,821				5,052				5,405		
	2,841				5,036				5,412		
	2,836				5,014				5,437		
0,8	3,384	3,344	0,036	4	5,123	5,139	0,06	8	5,458	5,466	0,014
	3,340				5,059				5,463		
	3,315				5,140				5,456		
	3,314				5,178				5,468		
	3,369				5,195				5,487		
1	3,524	3,537	0,022	4,5	5,237	5,245	0,02	9	5,451	5,454	0,052
	3,541				5,276				5,460		
	3,541				5,241				5,376		
	3,514				5,241				5,498		
	3,564				5,231				5,483		
1,5	4,033	4,046	0,022	5	5,293	5,280	0,028	10	5,454	5,460	0,03
	4,068				5,310				5,417		
	4,023				5,245				5,479		
	4,041				5,278				5,480		
	4,065				5,272				5,471		
2	4,317	4,385	0,044	5,5	5,351	5,352	0,018	12	5,442	5,444	0,028
	4,409				5,344				5,404		
	4,406				5,330				5,467		
	4,402				5,361				5,465		
	4,389				5,374				5,445		



Obr. 58: Měření váhy vzorku v závislosti na době dotlaku. Materiál PP Mosten, $T_i = 230^\circ\text{C}$, $T_f = 40^\circ\text{C}$. Filmový vtok zamrzl po 2,5s, modifikovaný vtok zamrzl po 7s



Obr. 59: Měření váhy vzorku v závislosti na době dotlaku. Materiál PC/ABS Pulse A35-110, $T_i = 270^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$. Filmový vtok zamrzl po 0,7s, modifikovaný vtok zamrzl po 2,9s

10.2 Smyková rychlost a viskozita

Smyková rychlost znamená míru změny rychlostního profilu a je definovaná vztahem

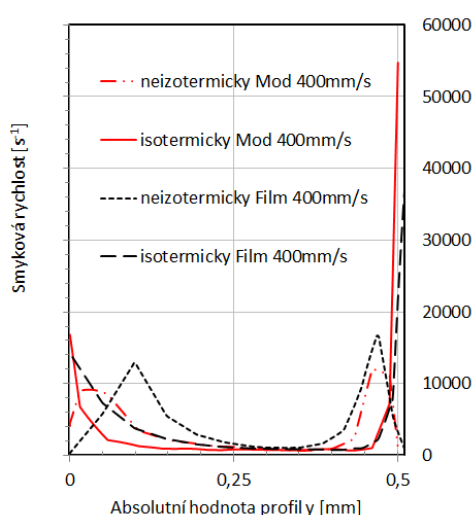
$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} = \frac{y}{h} \frac{dy}{dt} \quad (90)$$

v ... rychlost toku

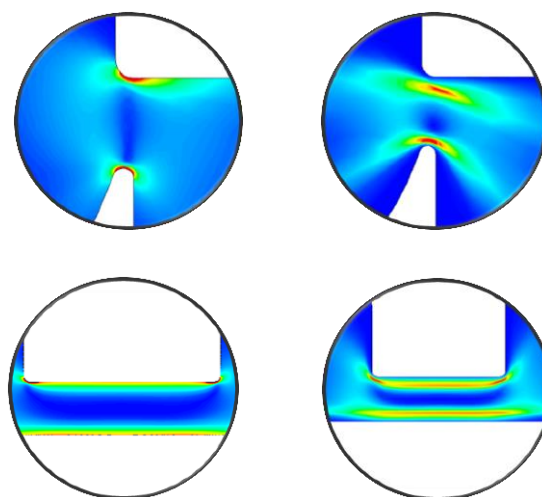
h ... výška kanálu

$\frac{dy}{dt}$... přírůstek dráhy v čase

Smyková rychlost je nulová na vrcholu rychlostního profilu a svého maxima dosahuje v povrchové vrstvě kanálu. Pro izotermický stav, kdy nedochází k chladnutí povrchové vrstvy, je největší smyková rychlost na hranici kanálu. V reálných podmínkách, kdy dochází k chladnutí taveniny, se pole smykové rychlosti posouvá dále od okraje na hranici zamrzlé vrstvy (obr. 60-61).

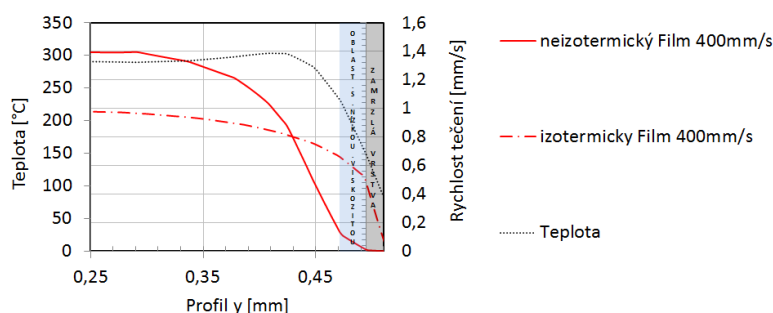


Obr. 60: Průběh smykové rychlosti profilem ústí vtoku pro izotermický a ne-izotermický modifikovaný vtok a filmový vtok při rychlosti toku 400 mm/s. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating



Obr. 61: Pole smykové rychlosti při 400mm/s pro izotermický děj (vlevo) a ne-izotermický děj (vpravo). Modifikovaný vtok nahoře, filmový vtok dole. Maxima smykové rychlosti pozici odpovídají pozici třecího tepla. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc.

Smyková rychlost je jedním z nejdůležitějších parametrů u ne-Newtonských kapalin, protože na její velikosti závisí dynamická viskozita, která se zvyšující se viskozitou klesá až do nekonečného viskózního toku, kdy se viskozita opět stává nezávislá na viskozitě. Důvodem je rozbalování makromolekulárních svazků do směru toku, jakmile dojde k úplnému narovnání makromolekul, odpor taveniny se již dále nemění. Orientování makromolekul do směru toku provází smykové a tahové napětí, které má trvalou a elastickou podobu. Pohyb makromolekul se děje natahováním svazků a otáčením jednotlivých větví ve svých konformačních polohách.^{9, 10}



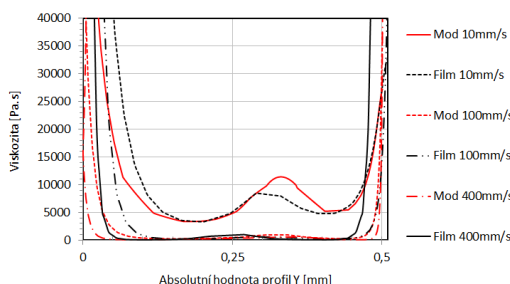
Obr. 62: Průběh rychlostního profilu pro izotermický a ne-izotermický děj s vyznačenou oblastí zamrzlé vrstvy a přechodovou oblastí s vysokou viskozitou, filmový vtok (Film), $v = 400 \text{ mm/s}$.

Modifikovaný vtok vykazuje menší smykovou rychlost než filmový vtok při ne-izotermickém ději, kdy dochází k odvodu tepla a kanál modifikovaného vtoku si zachovává větší průřez. Při izotermickém ději, kdy nedochází k ochlazování taveniny, vykazuje modifikovaný vtok vyšší smykovou rychlost na hranici kanálu. Je to způsobené větší změnou rychlosti vlivem geometrie vtoku, resp. zamrzlou vrstvou. Ohřátím stěny formy došlo ke zvýšení smykové rychlosti v oblasti tvarového vrubu. Při vyšší teplotě a vyšší smykové rychlosti lze předpokládat snížení viskozity v oblasti vrubu.

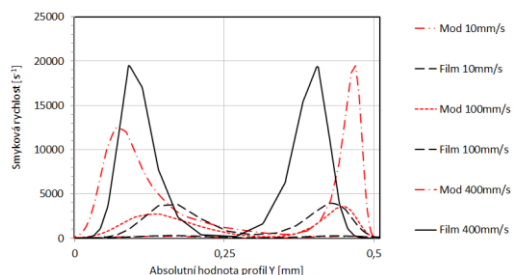
Viskozita popsaná v kapitole 6.3 viskoelastické kapaliny má smykový a normálový (tahový) charakter.

Smyková viskozita je nejprve konstantní a kapalina se chová jako Newtonská. V určité oblasti klesá s rostoucí smykovou rychlostí až do nekonečné viskozity, kdy se stává opět konstantní. Naopak tahová viskozita v určité oblasti smykové rychlosti (v počátku zdánlivé viskozity) roste s rostoucí smykovou rychlostí a s rostoucí smykovou rychlostí opět klesá.⁴³ V oblastech s vyšší smykovou rychlostí je více známá smyková viskozita,

tahová viskozita se v literatuře vzhledem k obtížnému získání dat příliš neuvádí.



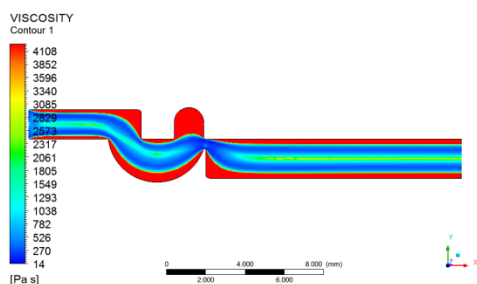
Obr. 64: Průběh viskozity pro modifikovaný (Mod) a filmový (Film) vtok při $v = 10, 100, 400$ mm/s. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc.



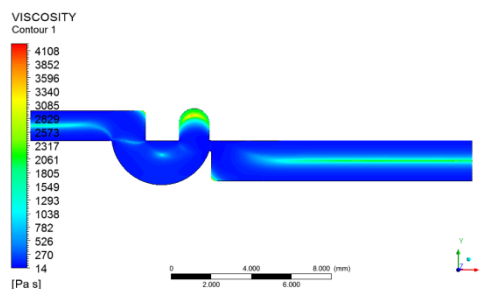
Obr. 63: Průběh smykové rychlosti pro modifikovaný (Mod) a filmový (Film) vtok při $v = 10, 100, 400$ mm/s. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc.

Vypočítaný průběh smykové viskozity profilem kanálu je podobný pro oba vtoky, lišící se pouze velikostí. Na rozhraní toku a stěny formy je viskozita největší a převažuje zde vliv teploty, kdy dochází k úplnému zamrznutí taveniny a teplota je téměř rovna teplotě stěny kanálu. V povrchové vrstvě ústí vtoku vychází nižší viskozita u modifikovaného vtoku, je to dané především vyšší teplotou taveniny v oblasti ústí vtoku resp. izolačními vlastnostmi modifikované geometrie.

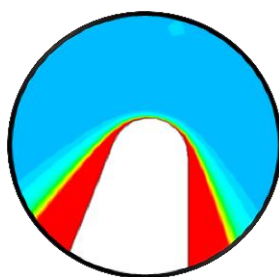
V jádru toku dochází k poklesu a opětovnému nárůstu. V této části kanálu dosahuje teplota zhruba neměnné teploty, ale smyková rychlost klesá ze svého maxima do svého minima. Rozdíl je největší při normálové viskozitě η_N , se zvyšující se smykovou rychlostí tento rozdíl klesá, tak jak se viskozita stává opět konstantní.



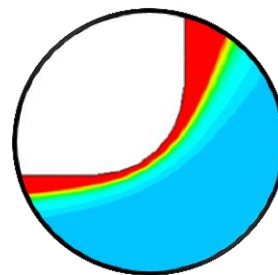
Obr. 65: Pole viskozity pro modifikovaný (nahore) a filmový (dole) vtok při $v = 400$ mm/s. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating



Obr. 66: Pole viskozity pro modifikovaný (nahore) a filmový (dole) vtok při $v = 400$ mm/s. Ansys, GNF Isothermal, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating



Obr. 68: Viskozita v oblasti ústí modifikovaného vtoku. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $v = 400$ mm/s, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc. max. viskozita v povrchové vrstvě rádiusu = 41kPa/s



Obr. 67: Viskozita v oblasti ústí modifikovaného vtoku. Ansys, GNF non-isothermal, PC, $v = 400$ mm/s, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, viscous heating calc. max. viskozita v povrchové vrstvě rádiusu = 85kPa/s

Diskuze výsledků z hlediska tokových vlastností

Teplota, smyková rychlost a viskozita spolu úzce souvisí a charakterizují tok kapaliny. Teplo může být dodané taveninou nebo může vznikat třením makromolekulárních řetězců. Třecí teplo přímo souvisí se smykovou rychlostí a smykovou viskozitou. Při kontinuálním toku taveniny kanálem dochází k odvodu tepla a vyrovnání dodaného a odvedeného tepla. Pokud je rychlost toku dostatečně velká a vyrovnává odvod tepla, nemůže dojít k zamrznutí ústí vtoku. Zpomalením toku převažuje odvod tepla a ústí vtoku zamrzá.

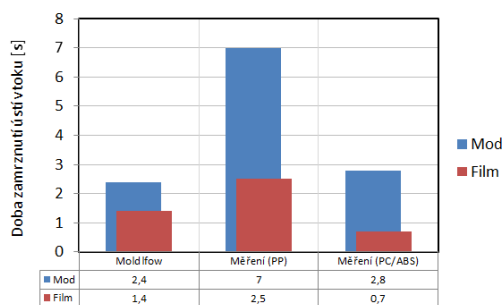
Výhody upravené geometrie vtoku se projevují především při pomalém toku nebo ve fázi dotlaku, kdy izolační nálitky způsobí zpomalení zamrznutí ústí vtoku. Po provedené simulaci v softwaru Moldflow zamrzl vtok ve fázi dotlaku o 40 % pomaleji, viz obr. 46-49. Rozdíl doby zamrznutí oblasti ústí vtoku se zmenšuje se zvyšující se rychlostí, viz obr. 53. Měření doby zamrznutí ústí vtoku potvrdilo numerický výpočet. Princip spočívá ve vážení výlisku do doby, než je váha výlisku konstantní. Při plnění materiálu PP Mosten zamrzá ústí modifikovaného vtoku v poměru o 64 % později, viz obr. 57. Při plnění materiálu PC/ABS Pulse A35-110 zamrzá ústí modifikovaného vtoku až o 75 % později, viz obr. 56.

Obě metody potvrzují lepší izolační vlastnosti modifikované geometrie ve srovnání s filmovým vtokem.

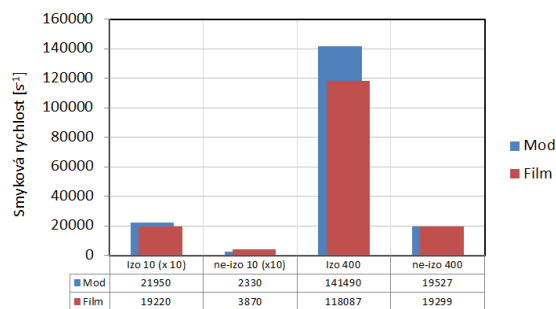
Smyková rychlost souvisí se změnou rychlostního profilu, upravená geometrie ústí vtoku je ostřejší než geometrie filmového vtoku. Důvodem je snaha o snazší odlomení vtoku od výlisku. Na druhou stranu oba rádiusy blízko kontrakce ústí by měly ostrou geometrii v průběhu toku vyhladit. Zanedbáním odvodu tepla lze zjistit vliv izolačních vlastností na smykovou rychlost. V oblasti ostrého rádiusu upraveného vtoku při rychlosti plnění 400 mm/s je extrém smykové rychlosti pro izotermický děj větší o 100 %, ale pro ne-izotermický děj menší o 30 % viz obr. 58. Důvodem je vyhlazení toku vlivem zamrznuté vrstvy a posun toku od ostrého rádiusu.

Při sledování povrchové vrstvy v oblasti ostrého rádiusu při rychlosti plnění 400 mm/s a ne-izotermickém ději je smyková rychlost opět o 66 % větší.

Smyková viskozita je v povrchové vrstvě ústí upraveného vtoku v oblasti ostrého rádiusu o 100 % nižší. Rozdíl viskozity v jádru kanálu lze zanedbat. Rozdíl viskozity mezi jádrem a povrchem kanálu se pro oba vtoky zvyšuje se zvyšující se rychlostí toku.



Obr. 69: Graf velikostí doby zamrznutí ústí vtoku, Moldflow + měření vážením, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film)



Obr. 70: Graf velikostí smykové rychlosti, GNF model, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), izotermický děj (izo), ne-izotermický děj (ne-izo), rychlost plnění 10 a 400 mm/s.

10.3 Výpočet celkového tensoru napětí T viskoelastické kapaliny

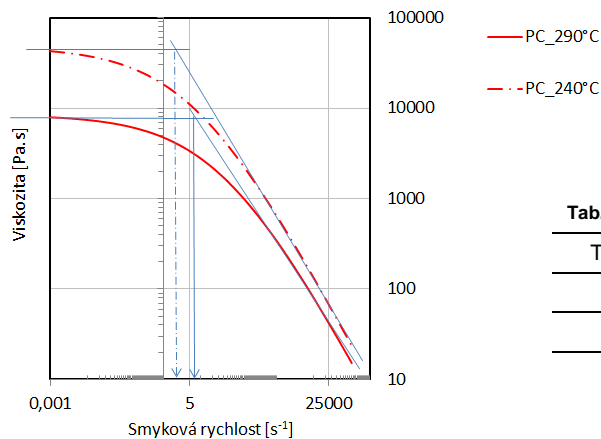
10.3.1 Určení míry viskoelasticity v oblasti ústí vtoku

Vlastnosti viskoelastické kapaliny byly podrobně popsány v kapitole 6. Viskoelastická kapalina obsahuje elastickou složku, plastickou deformaci v podobě viskózního toku a zároveň zpožděně elastickou složku tzv. paměť. Zároveň vzhledem k charakteru svazků makromolekul se viskoelastická kapalina vyznačuje rozdílem normálových napětí (viz. Weissenbergův efekt). Míru viskoelasticity určuje Weissenbergovo nebo Deborovo podobnostní číslo, podrobně popsané v kapitole 8. Technologie vstřikování probíhá při velkých smykových rychlostech a s teplotami vysoko nad teplotou tzv. viskózního toku T_f u amorfních plastů a teplotou tání T_m u semikrystalických plastů.

Tak, jak roste teplota, klesá čas relaxace. Ten určuje dobu vymizení napětí viskoelastické kapaliny, resp. míru deformace do beznapěťového stavu.

Určení času relaxace

Pro materiál PC použijeme model viskózních křivek Carreau-Yasudda s odlišnou teplotou. Čas relaxace lze zjistit převrácenou hodnotou smykové rychlosti, kdy dochází k Ne-Newtonskeému toku.^{38, 39}



Tab. 8: Odměřený čas relaxace podle obr. 71

Teplota	Smyková rychlost	Čas relaxace
290	5,2	0,19
260	3,33	0,3
240	2,5	0,4

Obr. 71: Křivka viskozity v závislosti na smykové rychlosti a teplotě. PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$ - $\lambda_{r290} = 0,19\text{s}$, $T_i = 240^\circ\text{C}$ - $\lambda_{r240} = 0,4\text{s}$, $T_i = 260^\circ\text{C}$ - $\lambda_{r260} = 0,3\text{s}$ Carreau-

Určení Weissenbergova čísla

$$Wi_u = \lambda_r \cdot \gamma = \lambda_r \frac{u_a}{h_u} \quad (91)$$

h_u ... výška profilu ústí vtoku

λ_r ... čas relaxace

Pro Newtonskou kapalinu lze průměrnou rychlost spočítat z parabolického rychlostního profilu jako

$$u_a = \frac{2}{3} u_{\max} \quad (92)$$

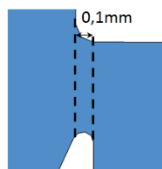
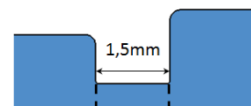
u_{\max} ... maximální rychlost profilu

Určení Deborova čísla

Pro určení Deborova čísla v oblasti ústí vtoku byla zvolena velikost kontrakce.

$$De = \frac{\lambda_r}{t} = \frac{\lambda_r \cdot u_a}{x} \quad (93)$$

x ... délka kontrakce ústí vtoku


Obr. 73: Délka kontrakce pro modifikovaný vtok, $x = 0,1$ mm

Obr. 72: Délka kontrakce pro filmový vtok, $x = 1,5$ mm

Tab. 9: Podobnostní číslo, Oblast ústí modifikovaného vtoku

Vstupní rychlost	Průměrná rychlost v ústí vtoku	Weissenbergovo číslo	Deborovo číslo
10	23	14	58
40	80	50	202
100	240	151	606
400	800	505	2022

Tab. 10: Podobnostní číslo, Oblast za ústím modifikovaného vtoku

Vstupní rychlost	Průměrná rychlost za ústím vtoku	Weissenbergovo číslo
10	6,6	0,8
40	20	2,5
100	86	10,9
400	276	34

Tab. 11: Podobnostní číslo, Oblast ústí filmového vtoku

Vstupní rychlost	Průměrná rychlost v ústí vtoku	Weissenbergovo číslo	Deborovo číslo
10	29	18	4,8
40	87	55	14
100	266	168	44
400	867	548	146

Tab. 12: Podobnostní číslo, Oblast za ústím filmového vtoku

Vstupní rychlost	Průměrná rychlost za ústím vtoku	Weissenbergovo číslo
10	6,3	0,8
40	20	2,5
100	86	10,8
400	275	34

Obě podobnostní čísla vycházejí při vyšších rychlostech poměrně vysoká a lze se domnívat, že ve sledovaném systému dochází v oblasti ústí vtoku převážně k elastickým deformacím (napětí). Srovnáním podobnostních čísel obou vtoků ve zkoumané oblasti zjistíme, že Weissenbergovo pod. číslo vychází mírně menší pro modifikovaný vtok a Deborovo pod. číslo vychází výrazně větší.

Podle velikosti Weissenbergova a Deborova podobnostního čísla lze usoudit, že v oblasti ústí vtoku dochází především k elastické deformaci.

Makromolekuly se tak elasticky orientují do směru toku v celém průřezu ústí vtoku a spolu s chladnutím taveniny makromolekuly zamrzají ve svých konformačních polohách s velkým vnitřním napětím. Za ústím vtoku se makromolekuly vracejí do toku a opět vytváření tzv. fontánový tok.

10.3.2 Tensor napětí čistě viskózního toku T

Zanedbáním elastické složky viskoelastické kapaliny dostaneme pouze viskózní tok. Tensor napětí určuje napětí kolmo a ve směru daného souřadného systému. Tensor napětí čistého toku je určen

$$T = 2\eta D \quad (94)$$

η ... dynamická viskozita

D ... deformační tensor, gradient rychlosti

Pro maticový zápis 2D souřadného systému platí:

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x} & \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ 0 & 2\eta \frac{\partial v_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (95)$$

$2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x}$... normálové napětí v ose x

$\frac{\partial v_x}{\partial x}$... gradient x rychlosti v ose x

$\eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)$... smykové napětí v rovině xy,

$\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)$... součet smykových rychlostí v osách x a y

$2\eta \frac{\partial v_y}{\partial y}$... normálové napětí v ose y, gradient rychlosti v ose y

$\frac{\partial v_y}{\partial y}$... gradient y rychlosti v ose y

Výpočet tensoru napětí čistě viskózního toku do značné míry určuje deformační tensor v podobě plastického toku makromolekulárních řetězců a nezohledňuje elasticitu makromolekul a rozdíl normálových napětí. Deformační tensor je dán gradientem rychlosti daných směrů a spolu s viskozitou způsobuje jak smykové, tak normálové napětí. Gradient rychlosti je míra změny rychlosti a souvisí s geometrií kanálu a rychlostí toku.

Výpočet tensoru napětí pro čistě viskózní tok byl proveden v Ansys Polyflow pomocí ne-izotermického a izotermického Obecně Newtonského modelu pro materiál PC a jako viskózní model byl použit Carreau-Yasudda. Lze tak porovnat výsledky ne-izotermického modelu s vlivem ochlazování taveniny a izotermického modelu později použitého při výpočtu celkového tensoru T . Materiálové konstanty modelu byly použity z vnitřní databáze materiálů pro polykarbonát na základě Carreau-Yasudda zákona.

Okrajové podmínky Obecného Newtonova modelu

materiál PC_nonisothermal, Generalized Newtonian non-isothermal flow problem, viskozita závislá na smykové rychlosti popsaná Carreau-Yasudda law, viskozita závislá na teplotě popsaná Arrhenius shear stress law, rychlost toku = 10, 40, 100, 400 mm/s (v), teplota taveniny 290°C ($Q_{př}$), teplota formy 70°C (Q_{odv}),

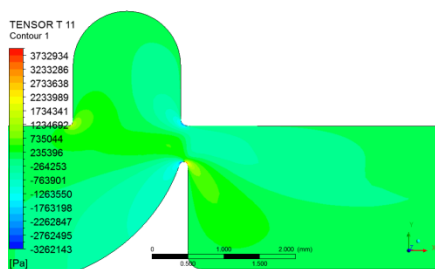
Okrajové podmínky izotermického Obecného Newtonova modelu

materiál PC_isothermal, Generalized Newtonian isothermal flow problem, viskozita závislá na smykové rychlosti popsaná Carreau-Yasudda law, rychlost toku = 10, 40, 100, 400 mm/s (v), $\eta_0 = 5856$ Pa.s

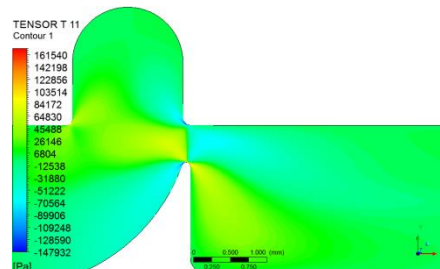
10.3.2.1 Normálové napětí čistě viskózního tensoru

Rozbor složky T_{11}

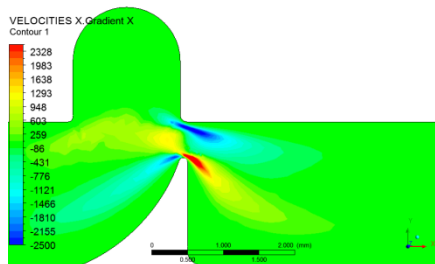
Tensor napětí ve směru proudnice má jak kladný tak záporný charakter a vyjadřuje normálové napětí ve směru osy x globálního souřadného systému. Při uvažování kladného směru toku souvisí urychlení toku v ose x s tahovým napětím a analogicky zpomalení toku souvisí s tlakovým napětím v ose x . Největší změna rychlosti tečení modifikovaného vtoku je v oblasti ostrého přechodu ústí vtoku a analogicky je v tomto místě možné pozorovat největší napětí, záporné nebo kladné. Tensor napětí T_{11} filmového vtoku dosahuje extrémů v oblastech s rádiusem. Tensor napětí T_{11} vychází menší pro modifikovaný vtok, tzn., že geometrie vtoku v ose x vykazuje menší změnu rychlosti.



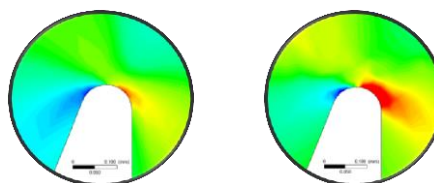
Obr. 75: Tensor T_{11} , Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400$ mm/s, steady state



Obr. 74: Tensor T_{11} , Izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $\eta_0 = 5856\text{Pa.s}$, $v = 400$ mm/s, steady state

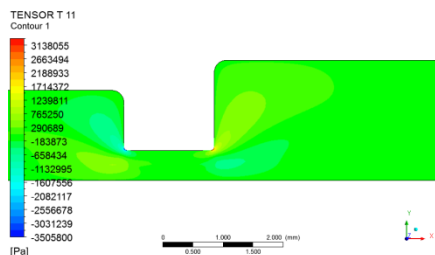


Obr. 78: Gradient rychlosti v ose x, Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400$ mm/s, steady state

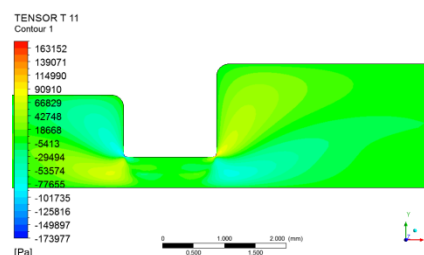


Obr. 77: Detail ostrého rádius, Tensor T_{11}

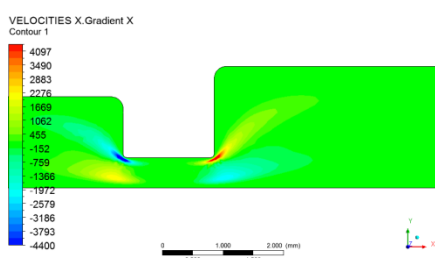
Obr. 76: Detail ostrého rádius gradient rychlosti v ose x



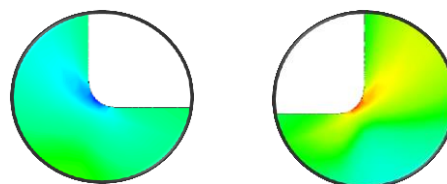
Obr. 80: Tensor T_{11} , Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400$ mm/s, steady state



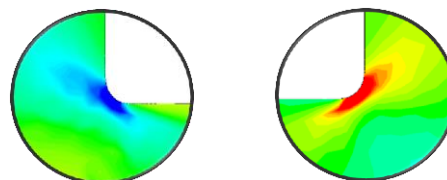
Obr. 79: Tensor T_{11} , Izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $\eta_0 = 5856\text{Pa.s}$, $v = 400$ mm/s, steady state



Obr. 82: Gradient rychlosti v ose x, Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400$ mm/s, steady state



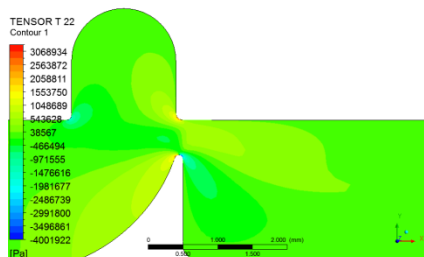
Obr. 81: Detail rádius filmového vtoku, Tensor T_{11}



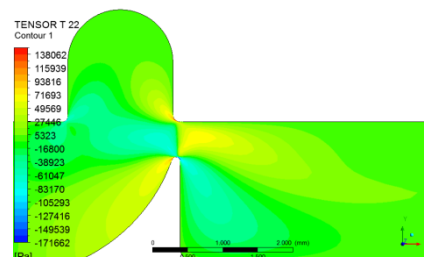
Obr. 83: Detail rádius filmového vtoku, gradient rychlosti v ose x

Rozbor složky T_{22}

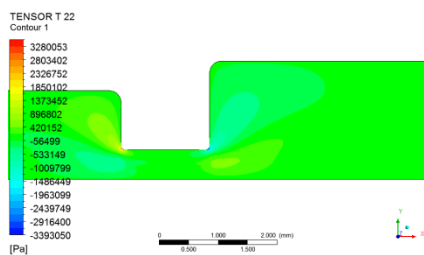
Gradient rychlosti vychází pro oba vtoky jak kladný, tak záporný. Složka rychlostního vektoru y může být kladná i záporná, podle toho, zda tavenina teče nahoru nebo dolů, resp. ve směru nebo proti směru celkového souřadného systému. Zároveň tavenina může zpomalovat nebo zrychlovat, gradient rychlosti je v tomto případě zavádějící a nelze s přesností říci charakter namáhání.



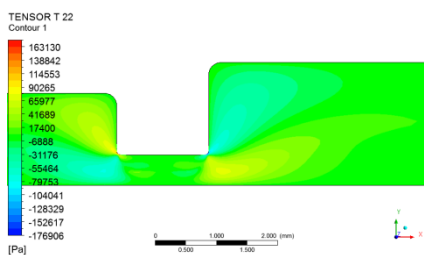
Obr. 85: Tensor T_{22} , Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400$ mm/s, steady state



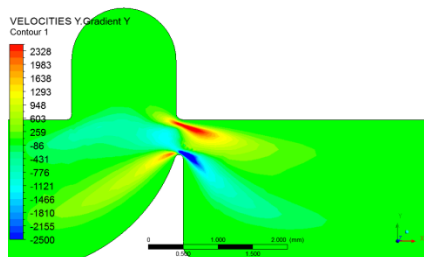
Obr. 84: Tensor T_{22} , Izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $\eta_0 = 5856\text{Pa.s}$, $v = 400$ mm/s, steady state



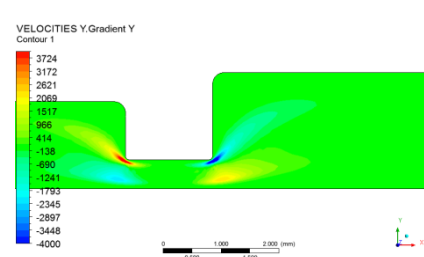
Obr. 87: Tensor T_{22} , Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400$ mm/s, steady state



Obr. 86: Tensor T_{22} , Izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $\eta_0 = 5856\text{Pa.s}$, $v = 400$ mm/s, steady state



Obr. 89: Gradient rychlosti v ose y , Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400$ mm/s, steady state



Obr. 88: Gradient rychlosti v ose y , Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400$ mm/s, steady state

Normálové napětí podél proudnice

Výpočet normálového napětí je definován jako oblast s malou plochou a vektorem rovnoběžným s tokovou čarou.⁵⁴

$$\sigma_v = \hat{v} \cdot T \cdot \hat{v} \quad (96)$$

\hat{v} ... jednotkový směr podél tokové čáry

T ... celkový tensor napětí

rovnici můžeme zjednodušit na

$$\sigma_v = \frac{v \cdot T \cdot v}{v \cdot v} \quad (97)$$

v ... vektor rychlosti

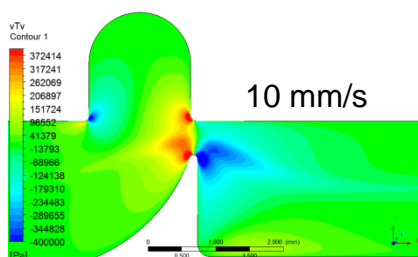
v.v ... čtverec rychlosti

Pro celkové normálové napětí platí

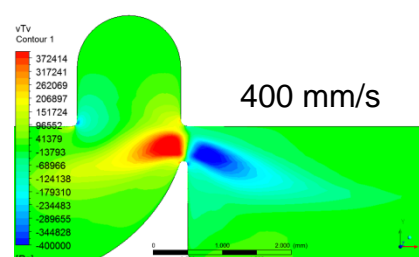
$$\sigma_n = -p + \sigma_v \quad (98)$$

p ... hydrostatický tlak

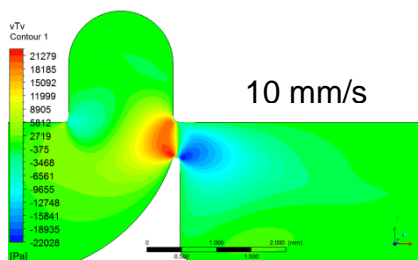
Celkové normálové napětí podél toku se liší v závislosti na rychlosti toku, tvaru vtoku a použití izotermického nebo ne-izotermického modelu. Před vstupem do kontrakce ústí vtoku dochází k urychlení toku a napětí roste. Tensor napětí obsahuje jak kladnou, tak zápornou složku. Kladné napětí ve směru toku představuje urychlení toku a záporné napětí zpomalení toku. Urychlení toku lze vysvětlit jako natažení makromolekul a zpomalení toku jako opětovné zkrácení makromolekul. Těsně před ústím vtoku jsou makromolekuly spíše natahovány a za ústím vtoku se natažení snižuje. Rychlost toku má vliv na velikost napětí a tvar pole napětí.



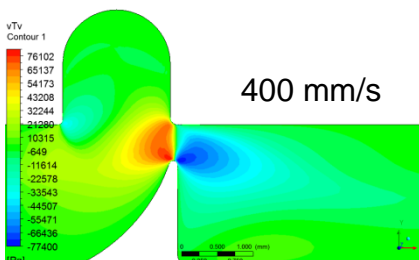
Obr. 91: Normálové napětí podél toku, Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state, max. normálové napětí +0,68MPa a -0,84MPa



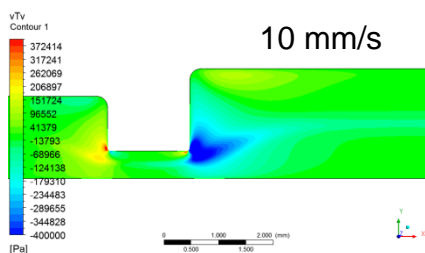
Obr. 90: Normálové napětí podél toku, Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state, max. normálové napětí +0,48MPa a -0,44MPa



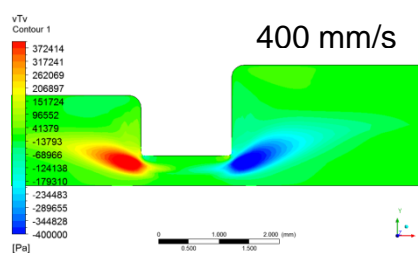
Obr. 93: Normálové napětí podél toku, Izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state, max. normálové napětí +0,022MPa a -0,021MPa



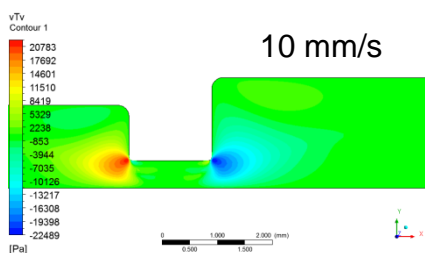
Obr. 92: Normálové napětí podél toku, Izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state, max. normálové napětí +0,081MPa a -0,077MPa



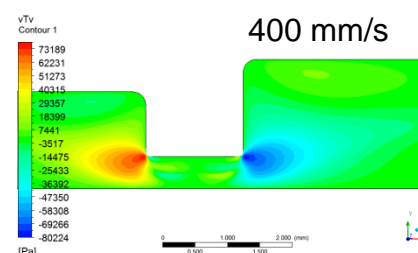
Obr. 95: Normálové napětí podél toku, Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state max. normálové napětí +0,55MPa, -0,87MPa



Obr. 94: Normálové napětí podél toku, Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state, max. normálové napětí +0,49MPa, -0,48MPa

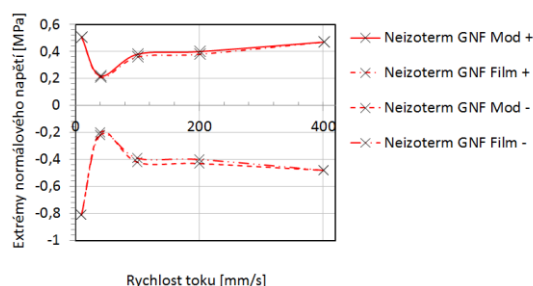


Obr. 96: Normálové napětí podél toku, Izotermický GNF model, filmový vtok, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state, max. normálové napětí +0,02MPa, -0,022MPa

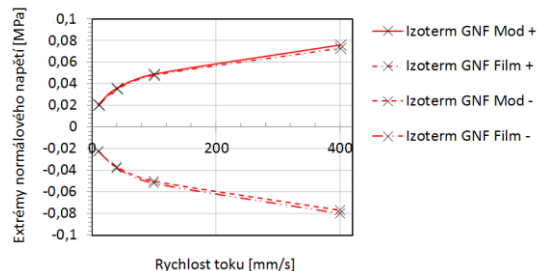


Obr. 97: Normálové napětí podél toku, Izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state, max. normálové napětí +0,078MPa, -0,08MPa

Normálové napětí ne-izotermického děje je největší při rychlostech, kdy dochází k předčasnému zamrznutí taveniny (10 mm/s), při zvyšování rychlosti napětí náhle poklesne a s dalším růstem vstřikovací rychlosti normálové napětí pozvolna roste. Tento průběh odpovídá měření tlaků v dutině formy v závislosti na rychlosti toku, kap. 13.2.2. Při izotermickém ději normálové napětí se stoupající rychlostí toku pouze roste.



Obr. 99: Průběh extrémů normálového napětí v závislosti na rychlosti toku, Ne-izotermický GNF model, filmový vtok (Film), modifikovaný vtok (Mod), + ... před ústím vtoku, -... za ústím vtoku, PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, 10, 40, 100, 200, 400 mm/s



Obr. 98: Průběh extrémů normálového napětí v závislosti na rychlosti toku, Izotermický GNF model, filmový vtok (Film), modifikovaný vtok (Mod), + ... před ústím vtoku, -... za ústím vtoku, PC, 10, 40, 100, 200, 400 mm/s

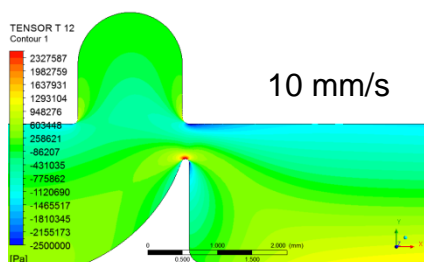
10.3.2.2 Smykové napětí čistě viskózního tenzoru

Rozbor složky T_{12}

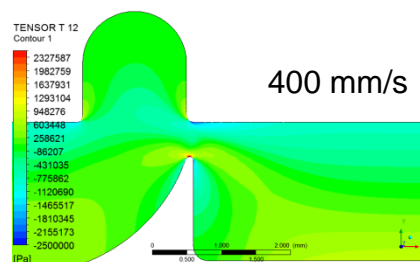
Gradient x složky rychlosti v ose y značí smykovou rychlost v souřadném systému xy. Napětí vyjádřené tenzorem určuje smykové napětí v s.s. xy. Gradient rychlosti xy vyjadřuje změnu rychlosti v ose x v závislosti na změně průřezu v ose y.

Gradient rychlosti xy je jedna složka tzv. smykové rychlosti (v ose x), která je jednou z nejdůležitějších veličin při dimenzování ústí vtoku, resp. určování způsobu plnění plastových výrobků.

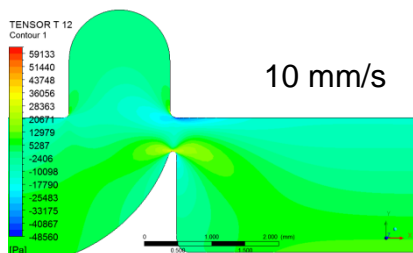
Vyšší gradient rychlosti vykazuje modifikovaný vtok v oblasti ostrého rádiusu a také tenzor napětí je v této oblasti vyšší, než v případě filmového vtoku.



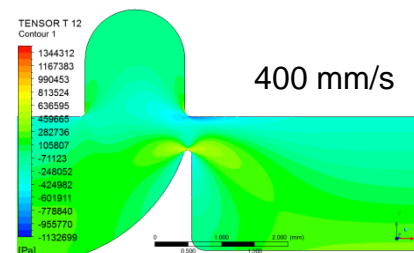
Obr. 101: Tensor T_{12} , Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_1 = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state



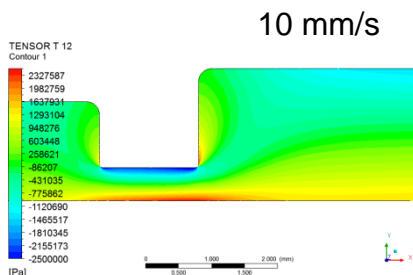
Obr. 100: Tensor T_{12} , Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_1 = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state. max. smykové napětí 3,8MPa



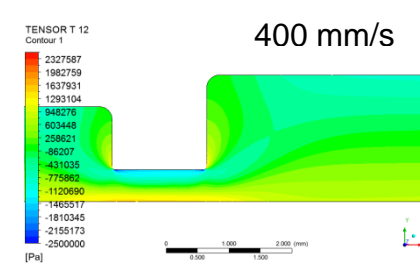
Obr. 102: Tensor T_{12} , Izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state



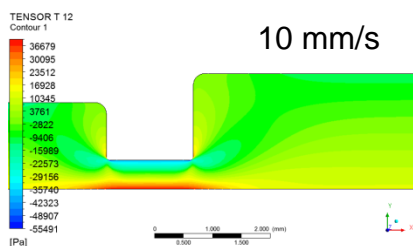
Obr. 103: Tensor T_{12} , Izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state. max. smykové napětí 1,3MPa



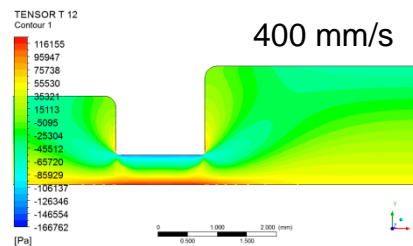
Obr. 105: Tensor T_{12} , Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $T_1 = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state



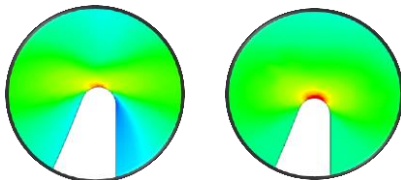
Obr. 104: Tensor T_{12} , Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $T_1 = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state. max. smykové napětí 2,9MPa



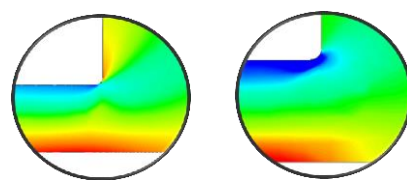
Obr. 107: Tensor T_{12} , Izotermický GNF model, , filmový vtok, PC, $v = 10$ mm/s, steady state



Obr. 106: Tensor T_{12} , Izotermický GNF model, , filmový vtok, PC, $v = 400$ mm/s, steady state. max. smykové napětí 1,6MPa



Obr. 109: Detail modifikovaného vtoku, Tensor T_{12} , (vlevo), gradient rychlosti xy (vpravo), Ne-izotermický GNF model, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 10$ mm/s, steady state



Obr. 108: Detail filmového vtoku, Tensor T_{12} , (vlevo), gradient rychlosti xy (vpravo), Ne-izotermický GNF model, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 10$ mm/s, steady state

Smykové napětí podél proudnice - Eigenvalue

Výpočet je definován jako oblast toku malou plochou s normálovým vektorem na směr toku.⁵⁴

$$f = T \cdot \hat{n} = \sigma \hat{n} \quad (99)$$

T ... tensor napětí

n ... normálový vektor

σ ... vlastní hodnota napětí

Rovnici 99 lze přepsat do tvaru

$$(T - \sigma I) \cdot \hat{n} = 0 \quad (100)$$

I ... jednotkový tensor

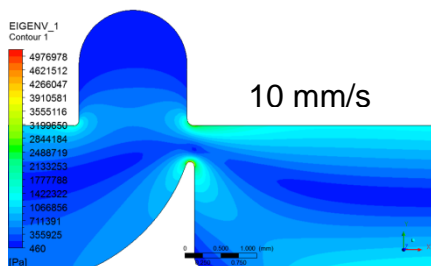
$$\det(T - \sigma I) = 0 \quad (101)$$

Smykové napětí se liší v závislosti na rychlosti plnění a použitým izotermickým nebo ne-izotermickým modelem.

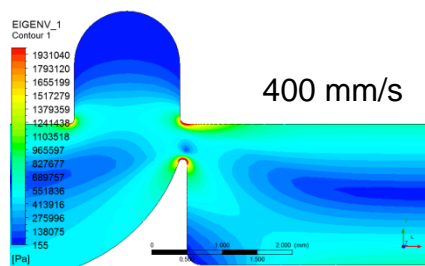
Při malých rychlostech plnění (10 mm/s) vzniká pouze malé třecí teplo a teplota v ústí vtoku klesla na hodnotu, kdy je smykové napětí větší, než při toku velkou rychlostí (400 mm/s).

Smykové napětí je nejvyšší na rozhraní stěny formy, kde je nastavená teplota formy 70°C a teplota zvyšuje viskozitu materiálu a zároveň smykové napětí. Smykové napětí je v oblasti ústí filmového vtoku nižší, než v oblasti

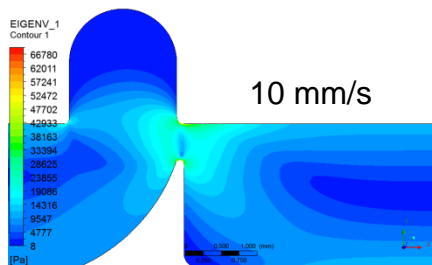
modifikované geometrie. Při malých vstřikovacích rychlostech je rozdíl napětí obou vtoků největší. Důvodem jsou lepší izolační vlastnosti modifikovaného vtoku, projevující se především při malých rychlostech vstřikování.



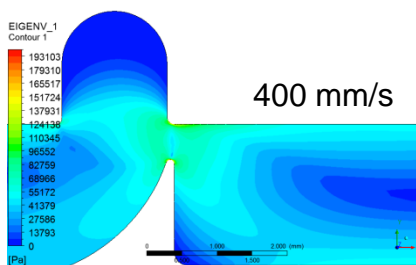
Obr. 111: Smykové napětí podél toku, Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state, max. smykové napětí napětí 4,9MPa



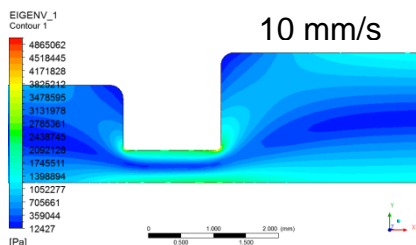
Obr. 110: Smykové napětí podél toku, Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state, max. smykové napětí napětí 3,76MPa



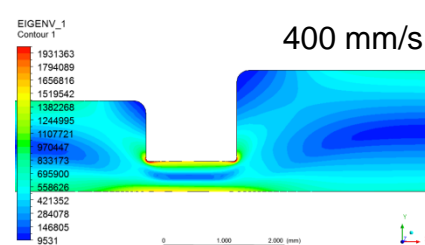
Obr. 113: Smykové napětí podél toku, Izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state, max. smykové napětí napětí 0,067MPa



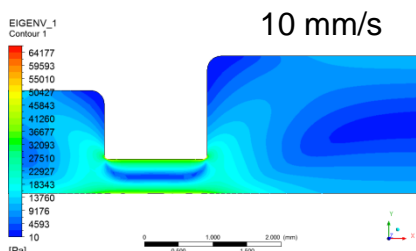
Obr. 112: Smykové napětí podél toku, Izotermický GNF model, modifikovaný vtok, PC, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state, max. smykové napětí napětí 0,2MPa



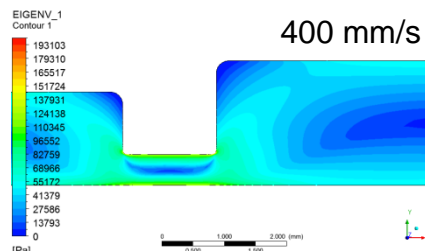
Obr. 115: Smykové napětí podél toku, Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, 290°C , 70°C , $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state, max. smykové napětí napětí 5MPa



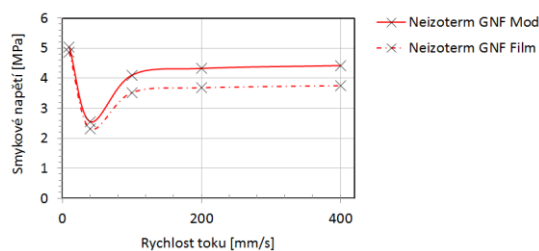
Obr. 114: Smykové napětí podél toku, Ne-izotermický GNF model, filmový vtok, PC, 290°C , 70°C , $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state, max. smykové napětí napětí 3,716MPa



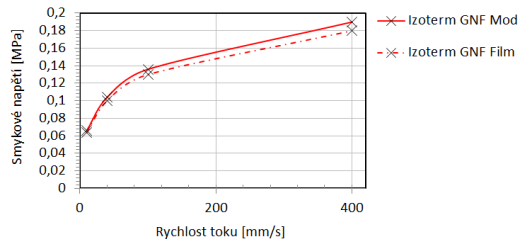
Obr. 117: Smykové napětí podél toku, Izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $v = 10 \text{ mm/s}$, steady state, max. smykové napětí napětí 0,06MPa



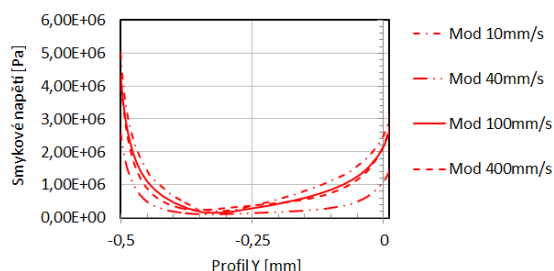
Obr. 116: Smykové napětí podél toku, Izotermický GNF model, filmový vtok, PC, $v = 400 \text{ mm/s}$, steady state, max. smykové napětí napětí 0,19MPa



Obr. 119: Průběh extrémů smykového napětí v závislosti na rychlosti toku, Ne-izotermický GNF model, filmový vtok (Film), modifikovaný vtok (Mod), PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, 10, 40, 100, 200, 400 mm/s



Obr. 118: Průběh extrémů smykového napětí v závislosti na rychlosti toku, Izotermický GNF model, filmový vtok (Film), modifikovaný vtok (Mod), PC, $v = 10, 40, 100, 200, 400 \text{ mm/s}$



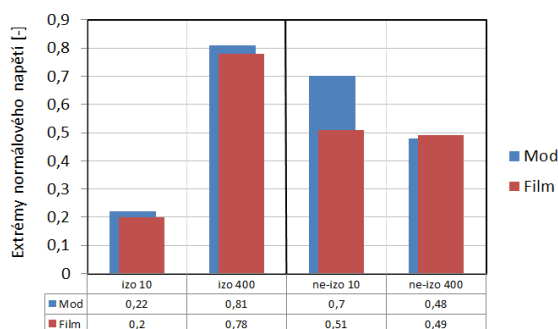
Obr. 120: Průběh smykového napětí v oblasti ústí vtoku v závislosti na rychlosti toku, Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok (Mod), PC, $T_t = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, 10, 40, 100, 200, 400 mm/s

Diskuze výsledků z hlediska napětí čistě viskózního toku

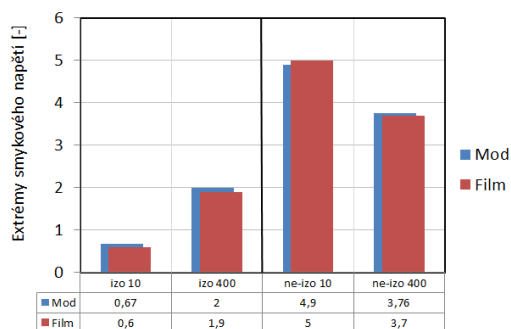
Vliv frikčního tření se projevuje u obou vtoků poklesem hodnot celkového tensoru napětí.

Pro ne-izotermický děj vychází normálové napětí až o 11 % větší při rychlosti 10 mm/s, se zvýšením rychlosti dochází k poklesu napětí a upravený vtok vychází o 3 % lépe ve srovnání s filmovým. Smykové napětí vychází naopak menší o 2 % při rychlosti 10 mm/s a větší o 1,5 %. Celkový tensor napětí vychází v průměru mírně větší pro upravenou geometrii vtoku ve srovnání s filmovým.

Tensor napětí vyjadřuje napěťový stav v závislosti na změně rychlosti. Vzhledem k výsledkům simulací odvodu tepla, kdy ústí upraveného vtoku zamrzalo později, můžeme usoudit, že větší napětí způsobuje výraznější urychlení toku taveniny vlivem ostřejší geometrie ústí vtoku. Výsledek gradientu rychlosti podél proudnice toku neumí software Ansys zjistit.



Obr. 122: Graf velikostí normálového napětí před ústím vtoku, GNF model, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film) izotermický (izo) a ne-izotermický (ne-izo) děj, rychlost plnění 10 a 400 mm/s.



Obr. 121: Graf velikostí smykového napětí před ústím vtoku, GNF model, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film) izotermický (izo) a ne-izotermický (ne-izo) děj, rychlost plnění 10 a 400 mm/s.

10.3.3 Tensor napětí viskoelastického toku T_1

Tensor napětí T viskoelastické kapaliny se skládá jak z čistě viskózní složky T_2 tak viskoelastické složky T_1 . Tensor napětí T_2 slouží jako stabilizační složka výpočtu a nahrazuje nekonečnou viskozitu. Tensor napětí T_1 lze vypočítat pomocí viskoelastických modelů jako Giesekus, PTT, PomPom model, Leonov, atd. s izotermickým nebo ne-izotermickým dějem. U viskoelastického toku s vysokým Weissenbergovým a Deborahovým číslem Wi , $De \gg 1$ vzniká problém s konvergencí a stabilitou výpočtu (tzv. HWNP problém). Především při ne-izotermickém výpočtu ustáleného toku je třeba více iterací numerického výpočtu, což často vede ke spadnutí numerického výpočtu, aniž by došlo k dostatečnému ustálení teplot. Z tohoto důvodu byl zvolen pouze izotermický výpočet toku viskoelastické kapaliny. Ke stabilizaci diferenciálního modelu lze použít několik metod: 4x4 SU, 4x4 SUPG, EVSS, AVSS, DEVSS, atd. ^{52, 54}

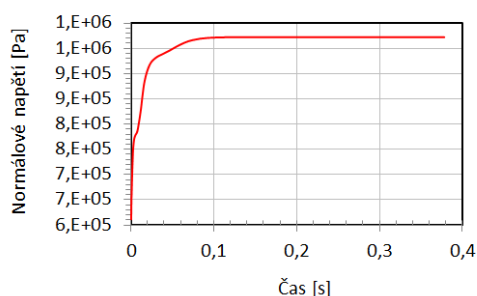
Při výpočtu Obecného Newtonova modelu v kapitole 12.3.2 byl počítán čistě viskózní tensor napětí T resp. T_2 pro ne-izotermický a izotermický ustálený tok. Tím jsme získali celkový viskózní tensor napětí bez vlivu historie dočasných elastických deformací. Při výpočtu viskoelastického tensoru napětí postupujeme podle zvoleného výpočtového modelu, který obsahuje jak viskózní, tak elastické napětí a uvažuje deformační historii polymeru. Dle Baltussena (2006) dochází k viskoelastickému chování taveniny nejen při

tvárování nebo vyfukování, ale i během vysokých smykových rychlostí odpovídajícím toku taveniny v dutině vstřikovací formy.⁶⁸

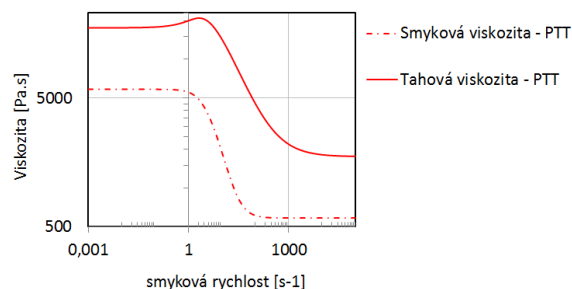
K výpočtu celkového tensoru napětí byl použit izotermický diferenciální viskoelastický model Phan-Thien-Tanner. Spolu s Giesekus, XPP a Leonov modelem je to jeden z nejrealističtějších modelů vhodný pro popis viskoelastického chování toku taveniny v celém rozsahu smykových rychlostí. Umožňuje výpočet se zohledněním rozdílu prvního a druhého normálového napětí elastického (dočasného) napětí s uvažováním historie toku při izotermickém nebo ne-izotermickém toku taveniny. K výpočtu tohoto modelu byl zvolen software Ansys Polyflow a vstupní hodnoty byly zvoleny dle publikací uvedených výše v textu a z interní databáze materiálů. Vzhledem k zanedbání tepelných dějů spojených se vstřikováním plastů a obtížně zjistitelných hodnot koeficientu viskoelastických modelů při vysokých teplotách a smykových rychlostí, lze brát vypočtené hodnoty tensoru napětí jako směrodatné, ale nepopisující přesně konkrétní situaci s odvodem tepla. Výsledek umožní získat dobrou představu vlastností obou vtoků a umožní popis viskoelastického chování v oblasti ústí filmového a upraveného vtoku. Zvolené koeficienty popisují materiál se zpevněním ε_1 a bez zpevnění ε_2 , s rozdílem normálových napětí odpovídající rozvětvenému polymeru ξ . Vzhledem k závislosti tahové viskozity na teplotě resp. vlivu teploty na míru zpevnění při dloužení lze předpokládat při ne-izotermickém ději různou velikost koeficientu ε , různou Newtonskou viskozitu η_0 a čas relaxace λ_r uvnitř profilu kanálu.³³ V pozorovaném ústí vtoku je vzhledem k třecímu teplu vysoký teplotní gradient a částečně můžeme teplotní profil považovat za konstantní, resp. při výpočtu viskoelastického modelu lze použít koeficienty, které odpovídají teplotě taveniny vysoko nad teplotou tání. Tento nereálný model aplikovaný pro obě varianty vtoku umožní získat představu o napětí a oba vtoky vůči sobě porovnat.

Okrajové podmínky viskoelastického výpočtu

materiál PC_isothermal, isothermal Differential viscoelastic model, PTT model, rychlost toku = 400, 100, 40, 10, 2, 0,5, 0,05 mm/s (v), $\lambda_r = 0,2528s$, $\eta_0 = 5856 s^{-1}$ (pro PC při 290°C), $\varepsilon_1 = 0,3$ (zpevnění při dloužení), $\varepsilon_2 = 2$ (bez výrazného zpevnění), $\xi = 0,35$ (dle Sweizera⁴⁸ pro rozvětvený polymer), $\eta_r = 0,1$, výpočet pomocí 4x4_SU



Obr. 124: Průběh stabilizace výpočtu pro normálové napětí, Izotermický PTT model, $\varepsilon=0,3$, $\xi=0,35$, modifikovaný vtok, $v=400$ mm/s, 4x4 SU, počet iterací 60, krok iterace 0,0025,



Obr. 123: Průběh smykové a tahové viskozity, Izotermický PTT model, $\varepsilon=0,3$, $\xi=0,35$, $\eta_0 = 5860s^{-1}$, $\lambda_r = 0,2528s$

10.3.3.1 Normálové napětí viskoelastického tensoru

Normálové napětí viskoelastické složky (deformační složky) rozdělíme pro lepší představu na složku v ose x, y a celkové napětí ve směru toku.

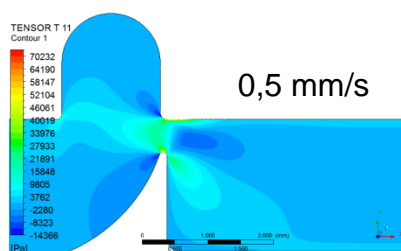
Míra napětí koresponduje s mírou natažení makromolekul ve směru toku a v povrchové vrstvě ústí vtoku dochází k největšímu dloužení makromolekulárních řetězců. Pokud bychom uvažovali ne-izotermický děj, dochází v souvislosti s postupným zamrzáním taveniny k zablokování elasticky deformovaných makromolekul a vzniku vnitřního pnutí převážně pak v povrchové vrstvě.

Rozbor viskoelastické složky T_{11}

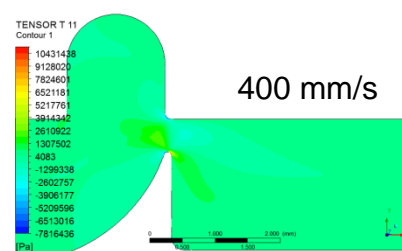
Podobně jako při výpočtu čistě viskózního tensoru napětí lze kladné normálové napětí interpretovat jako urychlení toku a záporné normálové napětí jako zpomalení toku. Čas relaxace představuje dobu, kdy poklesne napětí na zhruba 1/3 původní hodnoty. Při vyšších smykových rychlostech nedokáže materiál kompenzovat rychlé deformace poklesem napětí a částečně dochází k elastické deformaci. Na obr. 126-128 lze pozorovat rozdíl mezi velice malou a velkou rychlostí toku. Při malé rychlosti dokáže materiál kompenzovat deformace způsobené tokem materiálu a průběh

viskoelastického napětí má spíše viskózní charakter. Naopak při velké rychlosti toku dochází k viskoelastické deformaci taveniny a tenzor napětí se dočasně deformuje po směru toku. Vliv viskoelasticity na napětí roste především za ústím vtoku díky zpožděné reakci materiálu. V oblasti ústí vtoku dochází k lokální změně napětí a čistě viskózní tenzor napětí ovlivňuje okamžitý nárůst gradientu rychlosti, za ústím vtoku dochází k ustálení toku a gradient rychlosti klesá. Viskoelastická složka tensoru napětí reaguje opožděně a za ústím vtoku nedojde k poklesu napětí okamžitě.

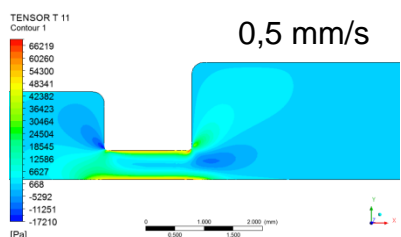
Viskoelastické napětí podle PTT modelu vychází za ústím vtoku vyšší pro modifikovaný vtok. Použitý izotermický jednostupňový PTT model je nedostačující pro určení míry nestability toku a nelze určit, zda průběh napětí je výhodnější pro jeden nebo druhý vtok.



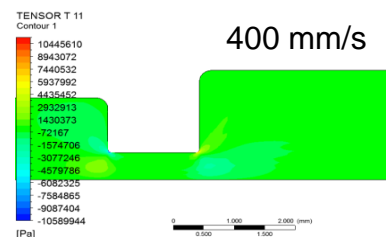
Obr. 126: Tensor T_{11} (viskoelastické napětí v ose x), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s



Obr. 125: Tensor T_{11} (viskoelastické napětí v ose x), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s



Obr. 127: Tensor T_{11} (viskoelastické napětí v ose x), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s

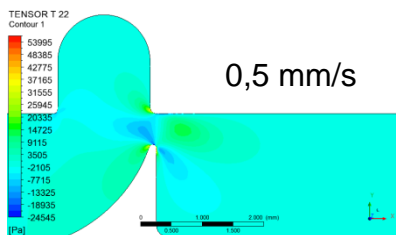


Obr. 128: Tensor T_{11} (viskoelastické napětí v ose x), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s

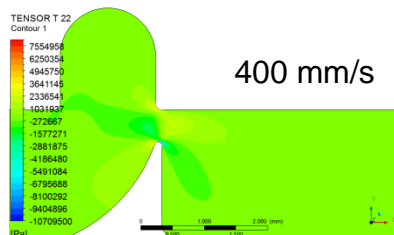
Podobný charakter vykazuje tenzor napětí v ose y a zároveň v rovině xy.

Rozbor viskoelastické složky T_{22}

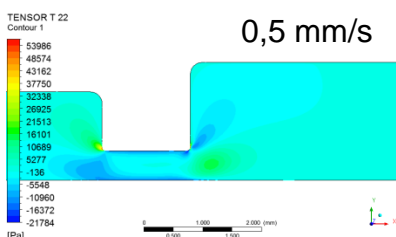
Vektor rychlosti nabývá kladné nebo záporné hodnoty v ose y podle směru toku. Gradient rychlosti určující tenzor napětí tak nabývá kladné nebo záporné hodnoty, aniž by bylo jasné, zda se jedná o zrychlení (tah) nebo zpomalení (tlak).



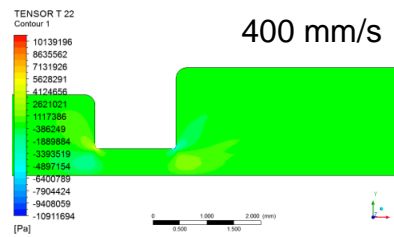
Obr. 129: Tensor T_{22} (čistě viskózní napětí v ose y), PTT model, $\epsilon_s = 0.3$, $\xi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5 \text{ mm/s}$



Obr. 130: Tensor T_{22} (čistě viskózní napětí v ose y), PTT model, $\epsilon_s = 0.3$, $\xi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400 \text{ mm/s}$



Obr. 132: Tensor T_{22} (čistě viskózní napětí v ose y), PTT model, $\epsilon_s = 0.3$, $\xi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5 \text{ mm/s}$



Obr. 131: Tensor T_{22} (čistě viskózní napětí v ose y), PTT model, $\epsilon_s = 0.3$, $\xi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400 \text{ mm/s}$

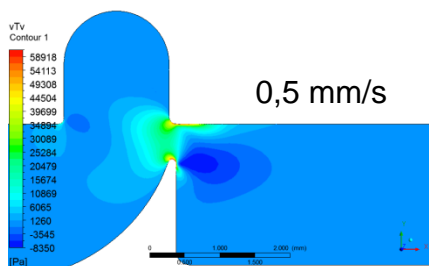
Normálové napětí podél proudnice

Celkové normálové napětí podél toku obsahuje jak viskózní, tak elastickou složku tensoru napětí a tensor napětí obsahuje jak kladnou, tak zápornou složku. Stejně jako u výpočtu tensoru napětí čistě viskózního toku lze kladnou složku interpretovat jako urychlení taveniny (tah) a zápornou složku jako zpomalení taveniny (tlak). K největšímu kladnému napětí dochází pro oba vtoky v oblasti ústí vtoku, resp. v povrchové vrstvě vtoku i plněného vzorku.

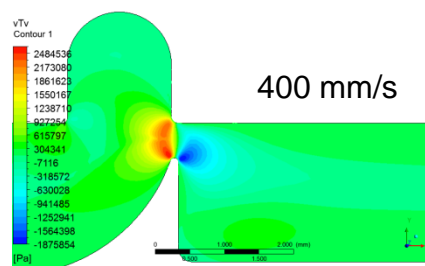
Modifikovaná geometrie vtoku izotermického modelu vykazuje vyšší napětí před ústím vtoku, ale nižší napětí za ústím vtoku ve srovnání s filmovým tokem. Rozdíl obou napětí je do 5 %.

Viskoelastická složka tensoru napětí je vzhledem k viskózní složce zanedbatelná, má však vliv na nestabilitu toku za ústím vtoku a projevuje se vzhledovými vadami při toku a po zamrznutí taveniny vnitřním pnutím.

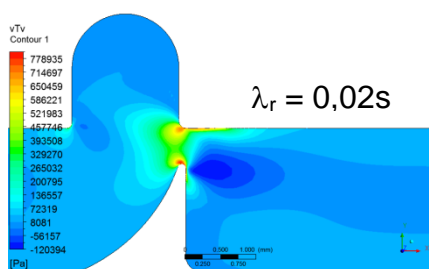
Zvýšením času relaxace v PTT modelu dochází za ústím vtoku k podobnému viskoelastickému zpoždění jako při zvýšení rychlosti toku a potvrzuje vliv času relaxace na zpožděnou deformaci viskoelastického toku.



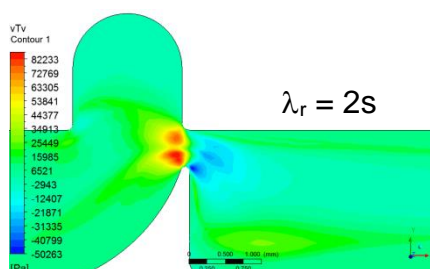
Obr. 134: vTv (celkové normálové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0,2528s$, izotermicky, $v = 0,5$ mm/s, max. normálové napětí +0,0589 MPa a -0,0083 MPa



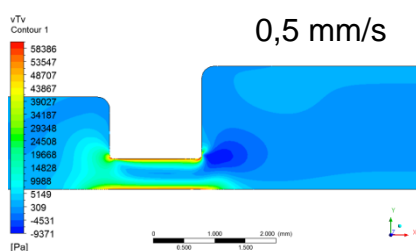
Obr. 133: vTv (celkové normálové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0,2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s, max. normálové napětí +2,48 MPa a -1,87 MPa



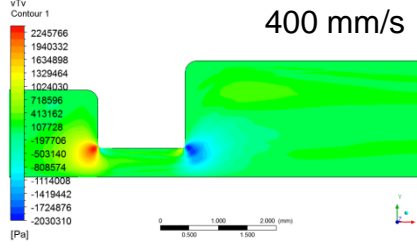
Obr. 136: vTv (celkové normálové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0,02s$, izotermicky, $v = 10$ mm/s



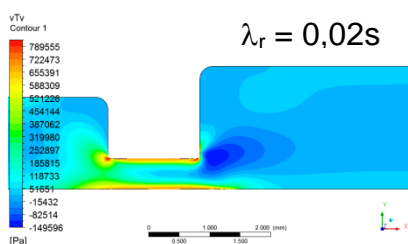
Obr. 135: vTv (celkové normálové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 2s$, izotermicky, $v = 10$ mm/s



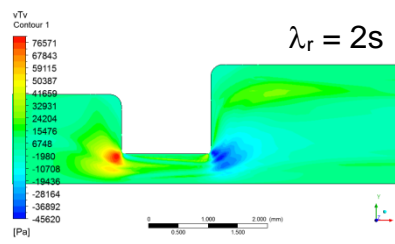
Obr. 138: vTv (celkové normálové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0,2528s$, izotermicky, $v = 0,5$ mm/s, max. normálové napětí +0,0583 MPa a -0,009 MPa



Obr. 137: vTv (celkové normálové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0,2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s, max. normálové napětí +2,24 MPa a -2,03 MPa



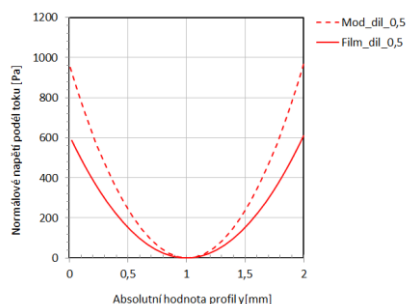
Obr. 140: vTv (celkové normálové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0,02s$, izotermicky, $v = 10$ mm/s



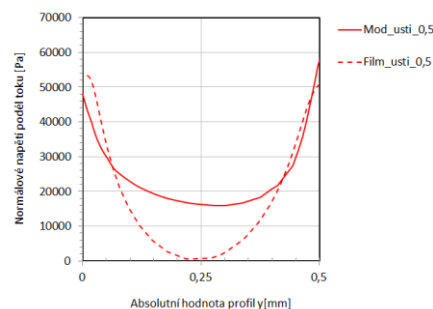
Obr. 139: vTv (celkové normálové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 2s$, izotermicky, $v = 10$ mm/s

Průběh napětí kanálem je při vysoké rychlosti toku cyklický a značí problém se stabilitou výpočtu. Výsledky získané při vysokých rychlostech nelze brát jako použitelné pro další diskusi. Při malé rychlosti toku je Weissenbergovo číslo nízké a výpočet viskoelastického toku je stabilní. Normálové napětí má v oblasti ústí vtoku i testovaného vzorku parabolický tvar. Normálové napětí

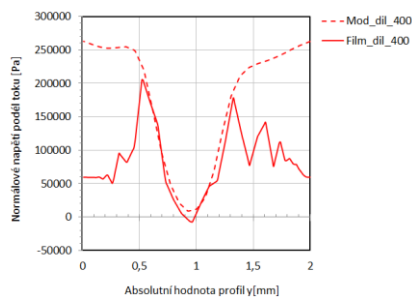
při rychlosti 0,5 mm/s za ústím vtoku vychází mírně vyšší pro modifikovanou geometrii vtoku.



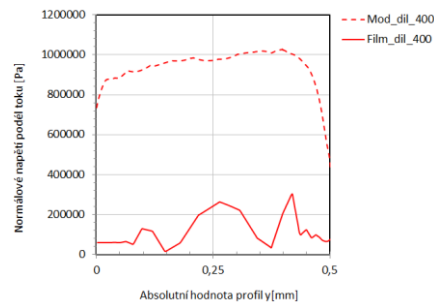
Obr. 142: Průběh normálového napětí za ústím vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s,



Obr. 141: Průběh normálového napětí v ústí vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s,



Obr. 144: Průběh normálového napětí za ústím vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s

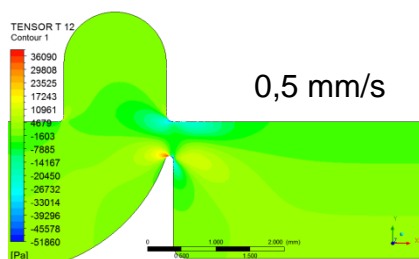


Obr. 143: Průběh normálového napětí v ústí vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s,

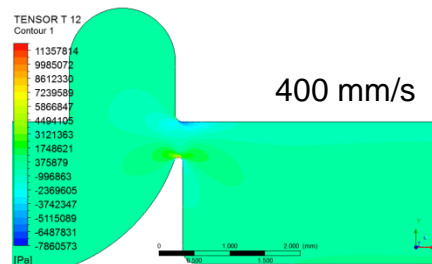
10.3.3.2 Smykové napětí viskoelastického tensoru

Charakter celkového smykového napětí viskoelastického PTT modelu má podobný charakter jako při výpočtu čistě viskózního toku (Obecný Newtonův model). V závislosti na velikosti Weissenbergova čísla ovlivňuje smykové napětí elasticita materiálu. Smykové napětí má při velké smykové rychlosti dominující charakter. Použité hodnoty smykové rychlosti odpovídají technologii vstřikování.

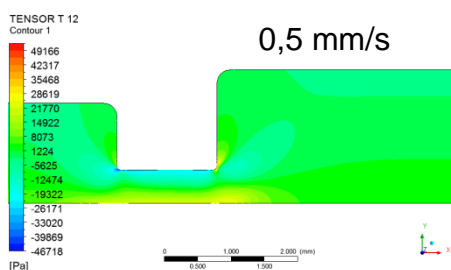
Rozbor viskoelastické složky T_{12}



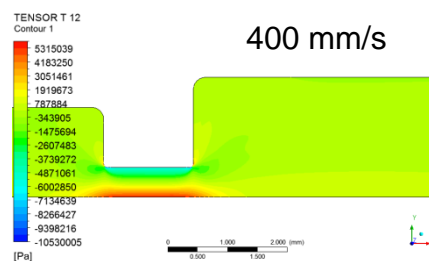
Obr. 146: Tensor T_{12} (smykové napětí v rovině xy), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s



Obr. 145: Tensor T_{12} (smykové napětí v rovině xy), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s



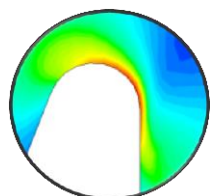
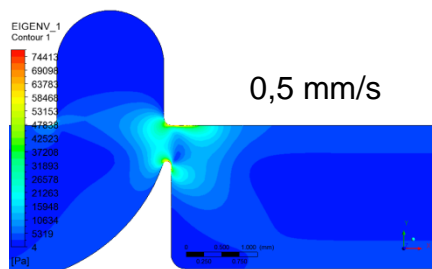
Obr. 148: Tensor T_{12} (smykové napětí v rovině xy), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s



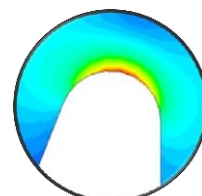
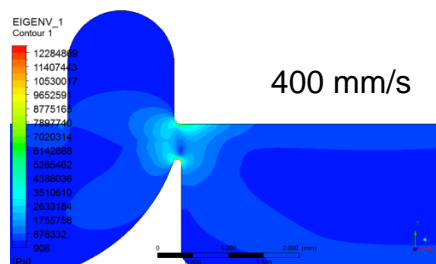
Obr. 147: Tensor T_{12} (smykové napětí v rovině xy), PTT model, $\epsilon_p = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s

Smykové napětí podél proudnice - Eigenvalue

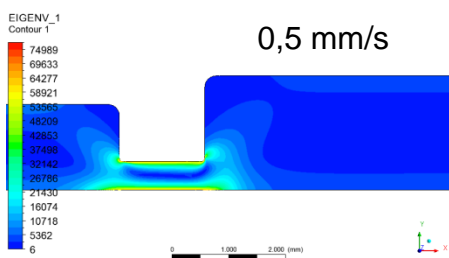
Smykové napětí podél toku je dáno smykovou rychlostí a smykovou viskozitou. Modifikovaný vtok podle izotermického výpočtového modelu PTT vykazuje menší smykové napětí při nižších rychlostech toku ve srovnání s filmovým vtokem, ten vykazuje nižší smykové napětí při vyšších rychlostech. Pro přesné určení velikosti viskoelastického tensoru napětí obou vtoků by bylo nutné vytvořit vícebodový ne-izotermický PTT model s přesnými koeficienty materiálových vlastností. Nyní se odchylka napětí obou vtoků pohybuje do 5 % a nelze s určitostí říci, zda modifikovaná verze vykazuje nižší nebo vyšší napětí v oblasti ústí vtoku ve srovnání s filmovým vtokem. Z výpočtu GNF modelu víme, že pro izotermický i ne-izotermický model vychází nižší smykové napětí převážně pro filmový vtok.



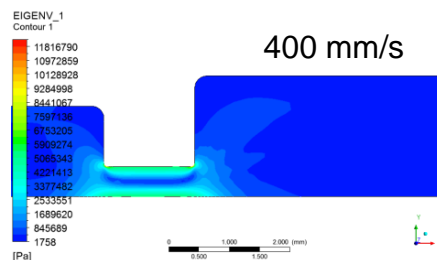
Obr. 150: Eigenv (smykové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s, max. smykové napětí +0,0744 MPa



Obr. 149: Eigenv (smykové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s, max. smykové napětí +12,28 MPa

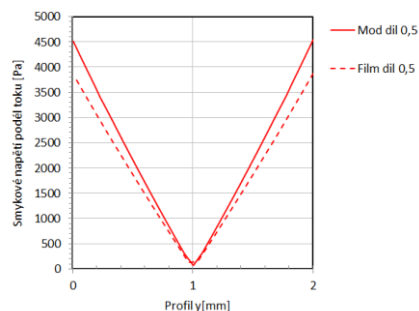


Obr. 152: Eigenv (smykové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s, max. smykové napětí +0,0749 MPa

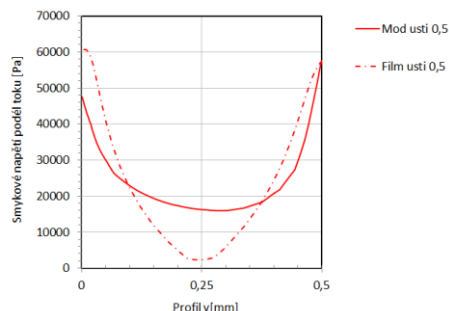


Obr. 151: Eigenv (smykové napětí podél toku), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s, max. smykové napětí +11,81 MPa

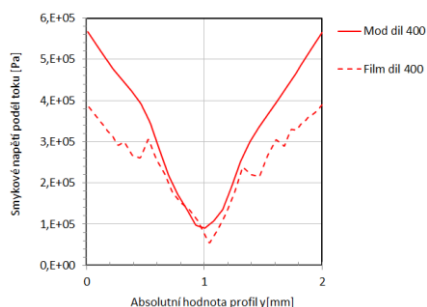
Průběh smykového napětí kanálem vtoku má podobně jako normálové napětí tvar paraboly. Stabilita výpočtu filmového vtoku je ovlivněna vysokým Weissenbergovým číslem. Při nízké rychlosti toku nedochází k cyklickému průběhu napětí a výpočet je dostatečně stabilní. Za ústím vtoku vychází smykové napětí v povrchové vrstvě vyšší pro modifikovaný vtok již při malé rychlosti 0,5 mm/s.



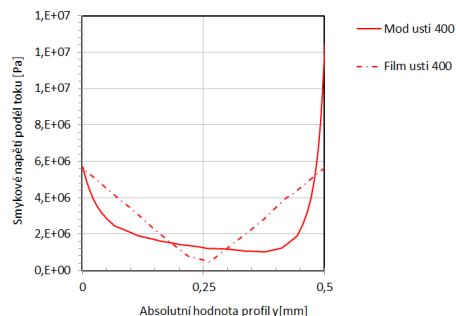
Obr. 154: Průběh smykového napětí za ústím vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s,



Obr. 153: Průběh smykového napětí v ústí vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s,

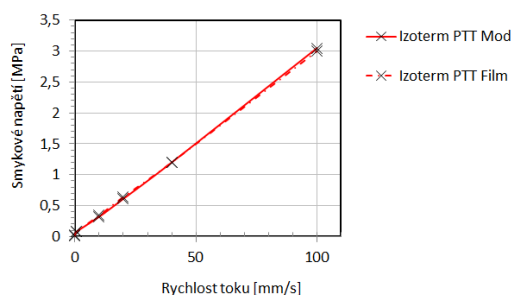


Obr. 156: Průběh smykového napětí za ústím vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon_s = 0.3$, $\xi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s,

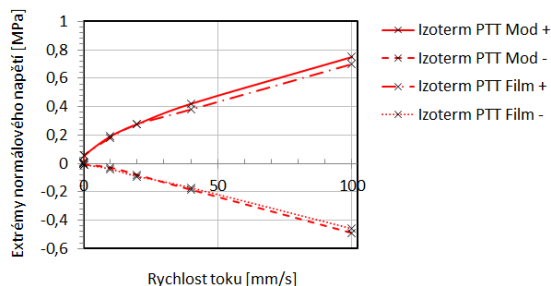


Obr. 155: Průběh smykového napětí v ústí vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon_s = 0.3$, $\xi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s,

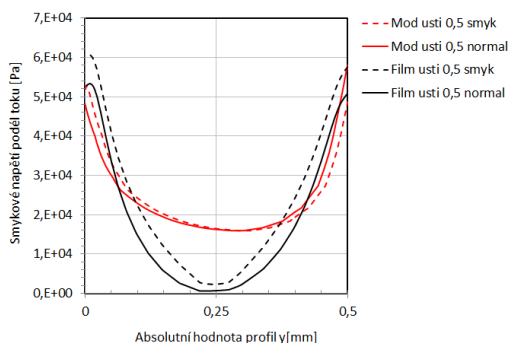
Podle výpočtu dominuje normálové napětí u modifikovaného vtoku a smykové napětí u filmového vtoku pro rychlost toku 0,05 mm/s. Při rychlosti 0,5 mm/s dominuje normálové napětí pro oba vtoky a s rostoucí rychlostí toku klesá podíl normálového napětí ve prospěch smykového napětí. Normálové a smykové napětí ovlivňuje deformační tensor závislý na gradientu rychlosti, resp. geometrii vtoku a tahové a smykové viskozitě. Nárůst podílu normálového napětí pak lze vysvětlit zpevněním tahové viskozity při nižších smykových rychlostech. Znamená to, že pro viskoelastický tok materiálu je nutné znát jak průběh smykové, tak tahové viskozity ovlivňující velikost normálového napětí.



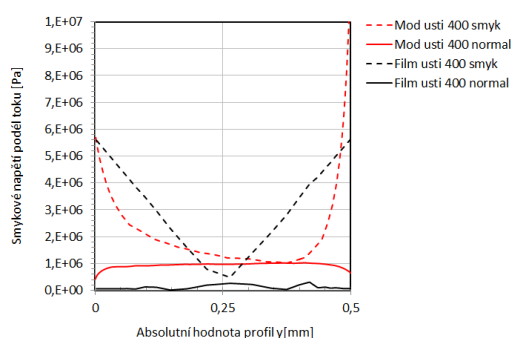
Obr. 157: Průběh smykového napětí v závislosti na rychlosti toku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon_s = 0.3$, $\xi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky



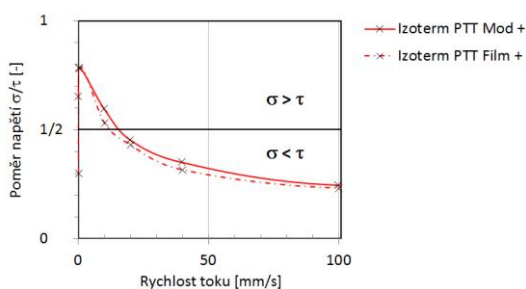
Obr. 158: Průběh normálového napětí v závislosti na rychlosti toku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon_s = 0.3$, $\xi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky



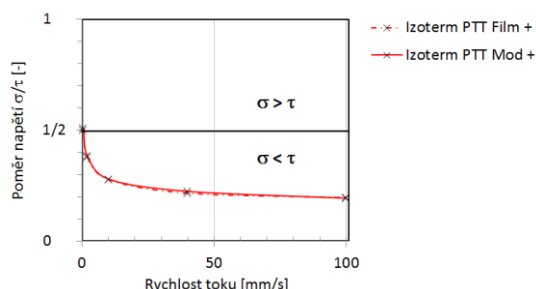
Obr. 160: Průběh smykového a normálového napětí v ústí vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s



Obr. 159: Průběh smykového a normálového napětí v ústí vtoku, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 400$ mm/s



Obr. 162: Poměr normálového a smykového napětí v ústí vtoku v závislosti na rychlosti toku pro materiál s tahovým zpevněním, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky



Obr. 161: Poměr normálového a smykového napětí v ústí vtoku v závislosti na rychlosti toku pro materiál bez tahového zpevněření, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), PTT model, $\epsilon = 2$, $\xi = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky

V reálných podmínkách se smyková rychlost v povrchové vrstvě během vstřikování pohybuje v průměru od 1000 s^{-1} . Tedy v době, kdy poměr tahové a smykové viskozity je opět přibližně roven třem ($Tr = 3$) a dominuje smykové napětí.

Výpočet viskoelastického tensoru napětí umožňuje získat dočasné napětí a má praktický význam při posuzování vzhledových vad a vnitřního pnutí. Pro oba vtoky vychází celkový tenzor napětí při použití izotermického 1mod PTT modelu s rozdílem 5 %. Při zohlednění lepších izotermických vlastností upravené geometrie se může tento rozdíl ještě zmenšit, především při nižších vstřikovacích rychlostech.

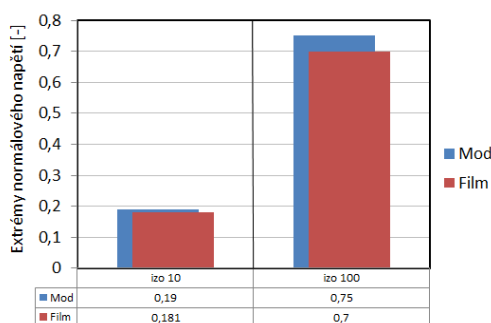
Diskuze výsledků z hlediska napětí viskoelastického toku

Viskoelastický tensor napětí je ovlivněn zpožděnou reakcí a dochází k jeho deformaci tokem. To dokazuje porovnání různých rychlostí toku nebo různé doby relaxace. Maxima smykového napětí jsou vždy v povrchové vrstvě toku, maxima normálového napětí přecházejí při vysoké rychlosti z povrchové vrstvy do celého profilu kanálu. Způsobuje to změna gradientu rychlosti a celkový tvar rychlostního profilu se mění z ostře parabolického na téměř hyperbolický.

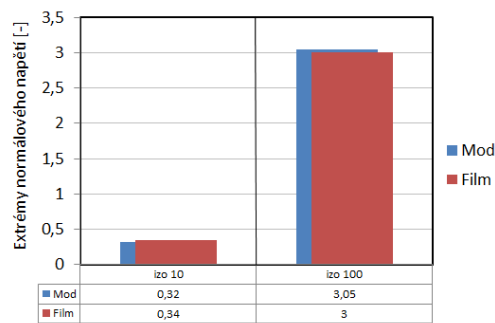
Materiál s tahovým zpevněním má při nízkých rychlostech převahu normálového napětí, u materiálu bez tahového zpevnění převládá smykové napětí v celém rozsahu rychlostí.

Celkový tensor napětí vychází v průměru mírně větší pro upravenou geometrii vtoku ve srovnání s filmovým. Pro přesné závěry by bylo nutné provést výpočet při ne-izotermickém ději s přesně určenými hodnotami viskoelastického modelu. Výpočet izotermického PTT modelu měl především objasnit vliv viskoelastivity kapaliny v oblasti ústí vtoku.

Z kapitoly vyplývá, že při toku viskoelastické kapaliny kontrakcí kanálu v oblastech vysokých smykových rychlostí by se mělo počítat s viskoelasticitou a čistě viskózní tok nelze brát jako 100% náhradu reálných podmínek.



Obr. 164: Graf velikostí normálového napětí před ústím vtoku, PTT model, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), izotermický (izo) děj, rychlost plnění 10 a 100 mm/s.



Obr. 163: Graf velikostí smykového napětí před ústím vtoku, PTT model, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film), izotermický (izo) děj, rychlost plnění 10 a 100 mm/s.

10.4 Celkové napětí (tlak) v tavenině

Tlak viskoelastické taveniny je důležitý ukazatel celkového napětí a zahrnuje hydrostatický tlak a normálové napětí celkového tensoru.

$$-\nabla p + \nabla \cdot T + f = \rho g \quad (102)$$

p ... hydrostatický tlak

T ... celkový tensor napětí

f ... hybnost

ρg ... gravitační síly na jednotku objemu

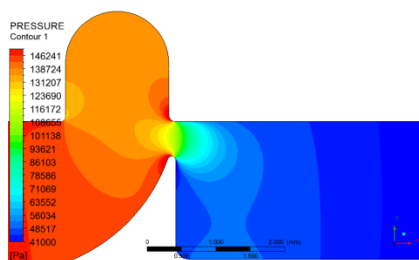
Hydrostatický tlak je odvozen ze zákona zachování energie

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2 \quad (103)$$

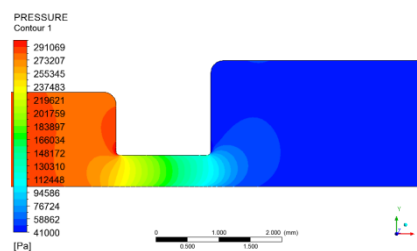
$v_{1,2}$... rychlost toku v kanále s průměrem $d_{1,2}$

$p_{1,2}$... statický tlak v kanále s průměrem $d_{1,2}$

Tlak taveniny byl získán pomocí izotermického viskoelastického PTT modelu s okrajovými podmínkami popsány v kapitole 12.3.3. Tlak taveniny klesá ve směru toku a největší tlaková ztráta nastává v zúžené oblasti vtoku (ústí vtoku). V oblasti rádiusů dochází k lokálním rozdílům tlaku taveniny. Pozice těchto rozdílů odpovídá extrémům tensoru napětí. V místech s nenulovým gradientem rychlosti se celkový tlak taveniny neshoduje s hydrostatickým tlakem. Před ústím vtoku dochází ke koncentraci napětí na stěně formy, těsně po vstupu taveniny do zúžené části tlak klesá a vzniká tlaková ztráta v oblasti ústí vtoku, za ústím vtoku dochází k lokálnímu poklesu tlaku (obr. 165-166). Tlakové pole v oblasti ústí vtoku souvisí s rychlostním gradientem tensoru napětí projevujícím se při změně rychlosti a spolu s hydrostatickým tlakem tvoří celkové tlakové pole.

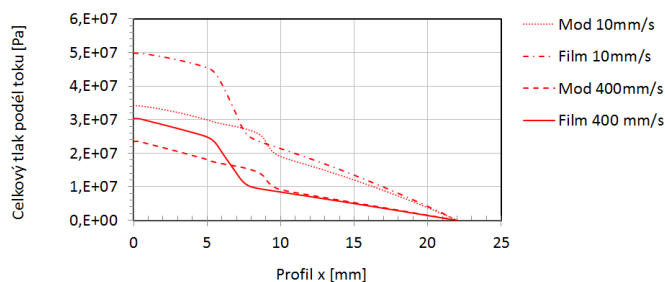


Obr. 165: Tlak kapaliny, PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s, max. tlakové napětí +0,199 MPa



Obr. 166: Tlak kapaliny, PTT model, $\epsilon = 0.3$, $\chi_i = 0.35$, $\lambda_r = 0.2528s$, izotermicky, $v = 0.5$ mm/s, max. tlakové napětí +0,32 MPa

Z praktického hlediska to má za následek horší kompenzaci smrštění v oblastech poblíž ústí vtoku, které jsou v zákrytu působení tlaku taveniny.

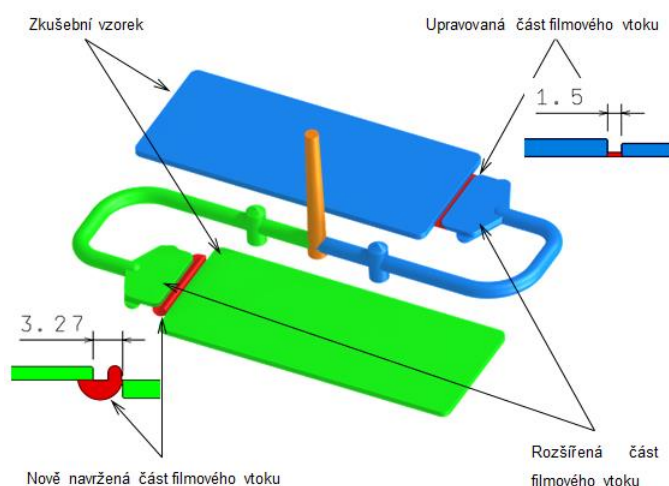


Obr. 167: Průběh celkového tlaku v závislosti na rychlosti toku, Ne-izotermický GNF model, modifikovaný vtok (Mod), filmový vtok (Film) PC, $T_i = 290^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, $v = 10, 40, 100, 200, 400 \text{ mm/s}$

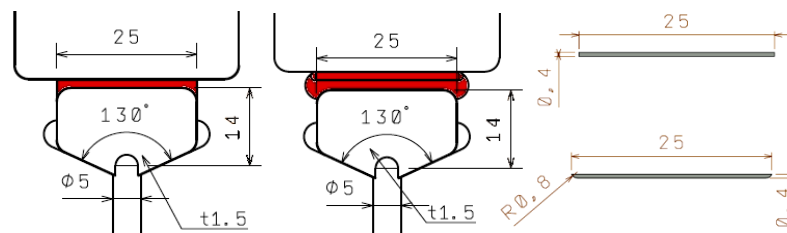
11 Měření některých stavových veličin

Tlak taveniny v dutině formy je určen hydrostatickým tlakem a viskózními odpory při toku viskoelastické taveniny polymeru. V oblasti kontrakce kanálu dochází k největší tlakové ztrátě dané viskozitou materiálu, rychlostí vstřiku, délkou a výškou kontrakce. V disertační práci jsou měřeny hodnoty tlaku taveniny v ose kolmé na směr toku a povrchové teploty před a za ústím vtoku. Získané hodnoty jsou porovnány s numerickou analýzou viskózního toku.

Pro účely měření byla navržena a vyrobena vstřikovací forma pro filmový a modifikovaný vtok plnicí zkušební tělísko. Oba vtoky se vůči sobě liší pouze v oblasti ústí vtoku (obr. 168-169), rozměr ústí vtoku, rozváděcího kanálu a zkušební tělísko je stejný. To zaručuje porovnání upravené geometrie s filmovým vtokem (etalonem). Konstrukce formy umožňuje oddělené plnění tělísek při stejných technologických parametrech.

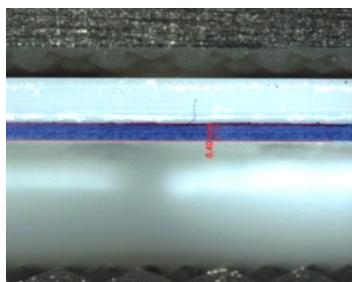


Obr. 168: Konstrukční uspořádání obou vtoků ve formě. Červeně zvýrazněná část značí rozdíl obou vtoků

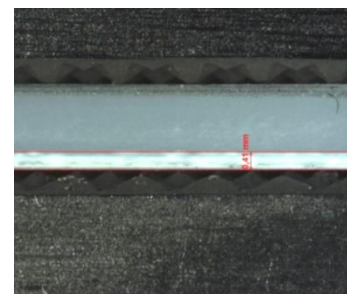


Obr. 169: Rozměry filmového modifikovaného vtoku s řezem podél ústí vtoku. Ústí vtoku je pro oba vtoky stejné 25x0,4mm.

Vzhledem k tvaru geometrie obou vtoků nemá filmový a modifikovaný vtok zcela stejný tvar ústí vtoku a liší se drobným rádiusem na okraji. Při toku taveniny dochází k odvodu tepla stěnou formy a činný průřez kanálu se zmenšuje. Rozdílný průřez má vliv na tok pouze v první fázi plnění a z praktického hlediska ho můžeme zanedbat. Po vyrobení formy byla obě vtoková ústí změřena optickým mikroskopem (obr. 170 - 171).



Obr. 171: Výška ústí vtoku změřená optickým mikroskopem, ústí filmového vtoku



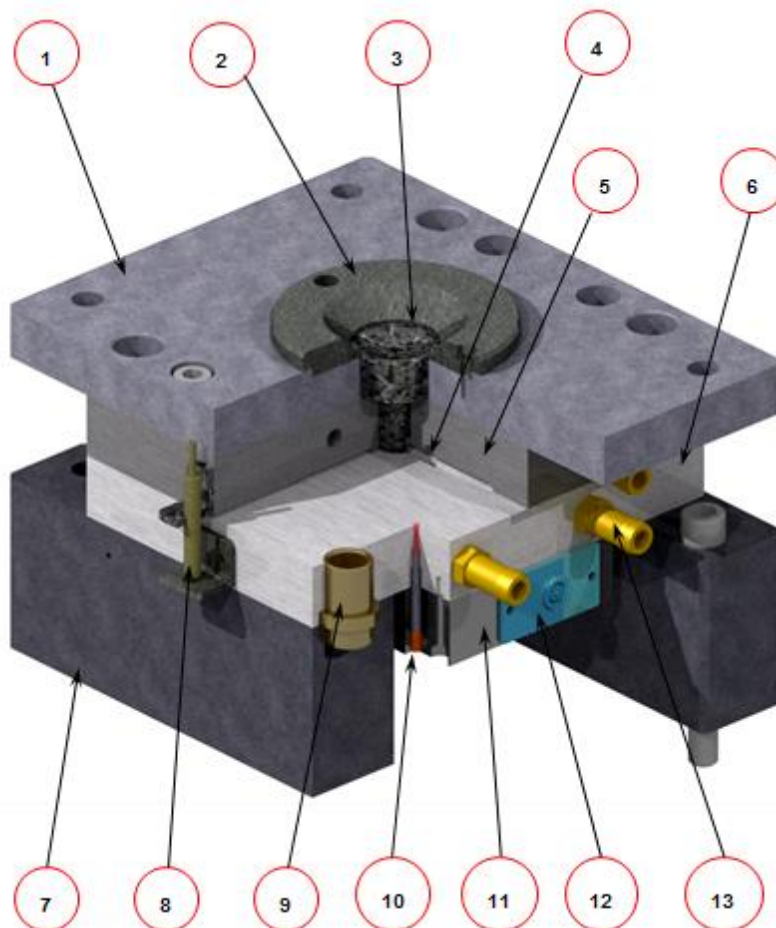
Obr. 170: Výška ústí vtoku změřená optickým mikroskopem, ústí modifikovaného vtoku

11.1 Konstrukce nástroje

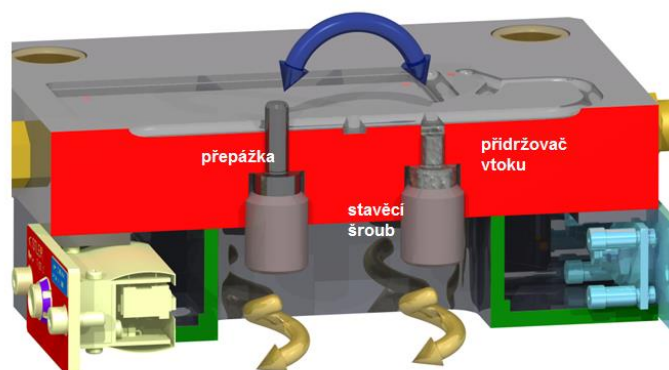
Výměnná přepážka v nástroji umožňuje plnění obou zkušebních tělísek nezávisle na sobě a nedochází tak k vzájemnému ovlivňování během plnění. Přepážku lze libovolně měnit i při upnutém nástroji na stroji (obr. 173).

Kanály chlazení formy jsou rovnoměrně rozmístěny s ohledem na stejnoměrné chlazení obou zkušebních tělísek. Voda proudí ($Re = 10\,000$ až $25\,000$) kanály o průměru 10 mm. Kombinovaná tlaková čidla o průměru 2,5 mm jsou umístěna v pohyblivé tvarové desce a jsou zajištěna vzpěrou a kotevní deskou. To zaručuje jejich odstínění ve formě a nedochází tak k nepřesnostem při měření. S ohledem na cenu nástroje nemá nástroj vyhazovací systém a upínací desku se středícím kroužkem na pohyblivé straně. Vyjmutí vylisku se provádí manuálně v poloautomatickém režimu

stroje. Desky a normativy byly dodány firmou Meusburger. Navržený vstřikovací lis pro nástroj je Engel 80/25 s uzavírací silou 80 t a průměrem šneku 22 mm.



Obr. 172: Vstřikovací nástroj pro oba vtoky a zkušební vzorky se zabudovanými tlakovými čidly. (1. Upínací deska (P 196 246/22/1730), 2. Středící kroužek (E 1362/100/90 x 12), 3. Vtoková vložka (E 1610/18 x 27/4), 4. Výměnná přepážka, přidržovač vtoku, 5. Tvarová deska pevné strany (F 050/156 196/27/2312), 6. Tvarová deska pohyblivé strany, 7. Rozpěrné desky (P 44 246/76/1730), 8. Indukční sensor pro počátek měření, 9. Kluzné pouzdro se středícím kolíkem (E 1100/15-27), 10. Tlakové p-T čidlo, vzpěra, závrtný šroub, 11. kotevní deska čidel, 12. Multi-přípojka Kistler, 13. Koncovka chladicího kanálu (E 2046/ 13/12))



Obr. 173: Odšroubováním stavěcích šroubů a prohozením přepážky s přidržovačem je možné vstřikovat zkušební těleso libovolným vtokem.

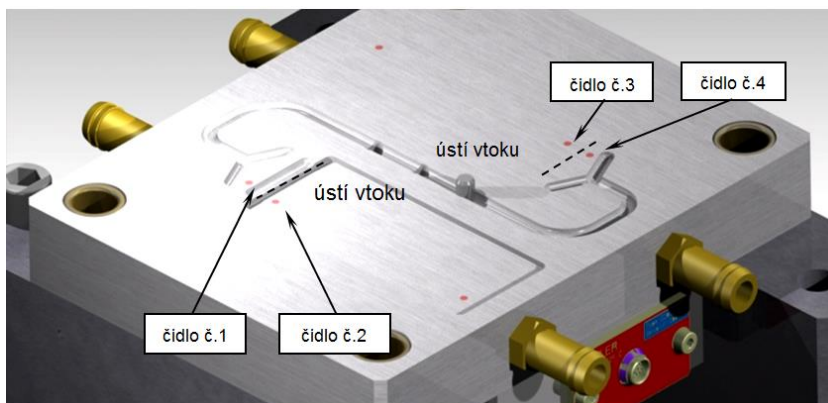
11.2 Měření tlaku v dutině formy

Velikost tlaku v dutině formy je jedna z veličin ovlivňující vstřikovací stroj a vstřikovací nástroj. U vstřikovacího stroje je nejvíce namáhané olejové čerpadlo, proporcionální ventily, hydraulické hadice, vedení hydraulických válců a mechanismus otevírání rámu s formou. Tlak taveniny v dutině formy namáhá desku tvárníku a tvárnice, vyhazovače (přidržovače) a díky zvýšené uzavírací síle i dělicí rovinu, resp. tlakové příločky. Vtoková soustava se chová jako odpor při tečení a díky stlačitelnosti taveniny se tlak taveniny v dutině formy snižuje. Největší vliv na tlakovou ztrátu ve vtokové soustavě má potom ústí vtoku, které z pravidla má nejmenší průřez. Čím je ústí vtoku menší a delší podél toku, tím je tlaková ztráta větší.

Měřený tlak taveniny v dutině formy (čidla 1-4) souvisí s hydrostatickým tlakem a normálovým napětím celkového tensoru T . První rozdíl normálových napětí $N_1 = T_{11} - T_{22}$ je pro viskoelastické kapaliny kladný a normálové napětí ve směru toku je větší než kolmo na tok. Hodnoty tensoru napětí jsou ovlivněny gradientem rychlosti a při ustáleném toku je tensor napětí nízký. Umístění čidel před a za ústím vtoku lze brát jako pozice s ustáleným tokem bez výrazného gradientu rychlosti a naměřené hodnoty odpovídají především hydrostatickému tlaku.

Forma a umístění čidel

Měření tlaku v dutině formy pomocí dvou kombinovaných tlakových čidel Kistler o průměru 2,5 mm umístěných před a za ústím vtoku.



Obr. 174: Umístění tlakových čidel KISTLER 6189a před a za ústím vtoku, vpravo p-T čidlo Kistler

Kombinovanými tlakovými p-T čidly 6189 lze měřit tlak taveniny současně s povrchovou teplotou taveniny (formy). Tlakové čidlo pracuje na principu

piezoelektrického efektu, kdy se při vnitřním napětí krystalu generuje elektrický náboj (měřeno v pC).

Umístění čidel umožňuje měření tlakových ztrát v oblasti ústí vtoku pro filmový a modifikovaný vtok. Vzhledem k posunutému ústí modifikované geometrie vtoku, není rozteč čidel stejná. Z hlediska zkušební destičky jsou obě čidla ve stejné vzdálenosti.

Zapojení měřící soustavy

Pro měření tlaků je nutné připojit zesilovač a převodník náboje na napětí, které je převedeno na zobrazený tlak a teplotu. Zařízení se nazývá CoMo. Výstup naměřených hodnot lze provést připojením osobního počítače. U použitého CoMa lze měřit maximálně čtyřmi čidly najednou, v případě měření tlaku před a za ústím vtoku byla zapojena pouze dvě tlaková čidla. Počátek záznamu lze provést signálem o počátku cyklu přímo ze stroje nebo signálem z koncového indukčního snímače, jako tomu bylo v tomto případě. Indukční snímač byl připojen na pevnou část formy a při jejím zavření byl vyslán signál do CoMa. Na (obr. 175) lze pozorovat situaci při měření tlaků.



Obr. 175: Měření tlaků v dutině zkušební formy

Měření tlaku v dutině formy bylo provedeno opakovaně s určením chyby měření. Odhad skutečné hodnoty získáme výpočtem ze souboru dat pomocí aritmetického průměru a nejistoty měření. Při výpočtu byla použita kombinovaná nejistota typu C, která je stanovena kvadratickým součtem

nejistot u_a a u_b . Nejistota u_a zahrnuje celkovou nestabilitu naměřených hodnot a závisí na počtu opakovaných měření. Nejistota u_b zahrnuje kvadratický součet chyb jednotlivých měřidel, v tomto případě chybu tlakového čidla. Rozdíly tlaků způsobuje nestabilita vstřikovacího procesu vlivem kolísání teploty taveniny, teploty formy, řízení rychlosti pohybu šneku při vstřiku atd.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots \text{aritmetický průměr} \quad (104)$$

$$u_a = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \dots \text{výpočet nejistoty typu A} \quad (105)$$

$$u_{ak} = k \cdot u_a \dots \text{rozšířená nejistota měření} \quad (106)$$

Tab. 13: Hodnoty korekčních koeficientů pro různé počty opakovaných měření

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

$$u_b = \frac{\pm \Delta Z}{\sqrt{3}} \dots \text{standardní nejistota typu B} \quad (107)$$

$$u_c = \sqrt{u_{ak}^2 + u_b^2} \dots \text{kombinovaná standardní nejistota} \quad (108)$$

$$U = K \cdot u_c \dots \text{standardní rozšířená nejistota} \quad (109)$$

Tab. 14: Koeficienty rozšíření

Pravděpodobnost kombinované nejistoty [%]	68	95	99	99.7
K	1	2	2.58	3

Kombinovaná standardní nejistota je vypočtena s pravděpodobností 68 %. Pro větší pravděpodobnost je kombinovaná standardní nejistota vynásobena koeficientem rozšíření $K = 2$. Dostaneme tak výsledek s pravděpodobností 95 %. To je pro běžnou praxi vyhovující.

Měření tlaků proběhlo vždy v pěti měřeních při daném (stálém) technologickém nastavení. Tzn. $n = 5$, $k = 1,4$.

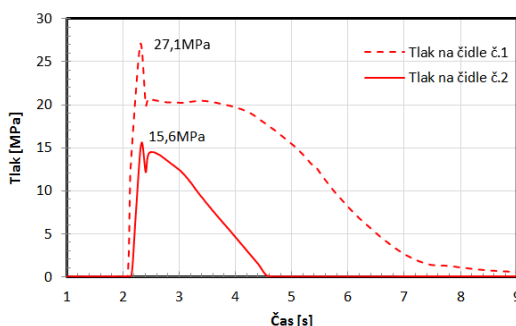
11.2.1 Průběh tlaku v závislosti na čase

Měření pomocí tlakových čidel

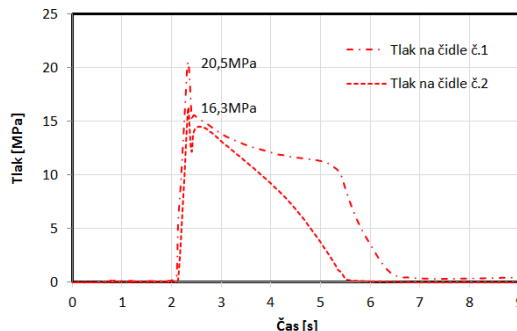
Hodnoty nastavené na vstřikovacím stroji

PC/ABS Pulse A35-105, rychlost vstřiku pro šnek $\varnothing 22$ mm: 86 mm/s, dotlak: 3s / 25bar, T_i : 270°C, T_f : 70°C

Profil křivky tlaku v dutině formy v závislosti na čase prudce roste a dosahuje maximální hodnoty (tlaková špička) odpovídající přepnutí na dotlak. Fáze dotlaku odpovídá pozvolna klesajícímu tlaku až na nulu. Míru poklesu tlaku v dutině formy modifikovaného a filmového vtoku určuje rychlost chladnutí taveniny v oblasti ústí vtoku. Tlaková špička před ústím vtoku je vyšší než za ústím vtoku a tato tlaková ztráta je výrazně nižší u modifikované geometrie vtoku. Větší tlaková ztráta filmového vtoku je dána rozdílnou délkou kontrakce, resp. viskózními odpory v oblasti ústí vtoku. Ve fázích dotlaku vykazuje modifikovaná geometrie za ústím vtoku vyšší tlak. Důvodem jsou lepší izolační vlastnosti vtoku projevující se především ve fázi dotlaku, kdy již nevzniká teplo získané třením.



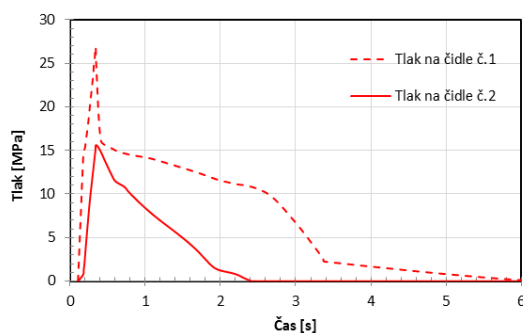
Obr. 177: Průběh tlaku změřeném tlakovými čidly na díle plněném filmovým vtokem. PC/ABS, $T_i = 270^\circ\text{C}$, 86 mm/s



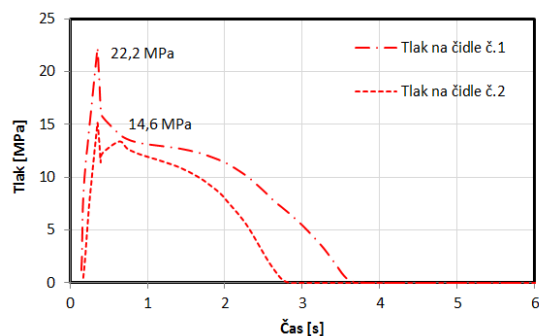
Obr. 176: Průběh tlaku změřeném tlakovými čidly na díle plněném upraveným vtokem. PC/ABS, $T_i = 270^\circ\text{C}$, 86 mm/s

Simulace

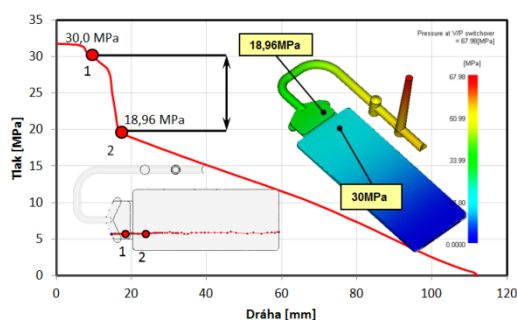
Nastavení simulace odpovídá výpočetnímu modelu popsanému v kapitole 12.1. Průběh tlaku vypočtený pomocí 3D numerické simulace v Moldflow odpovídá s odchylkou cca. 2 MPa (10 %) reálnému měření tlaků v dutině formy.



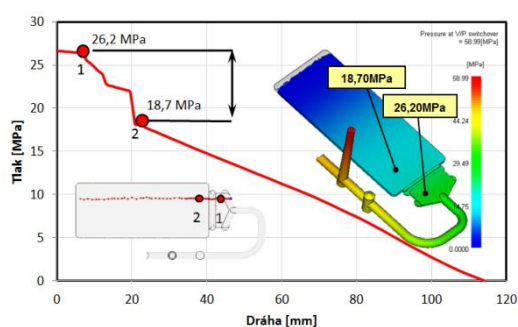
Obr. 179: Průběh tlaku, Moldflow, filmový vtok. PC/ABS, $T_1 = 270^\circ\text{C}$, 86 mm/s



Obr. 178: Průběh tlaku, Moldflow, upravený vtok. PC/ABS, $T_1 = 270^\circ\text{C}$, 86 mm/s



Obr. 180: Tlakový spád, filmový vtok. Moldflow, PC/ABS, 3D mesh, $T_1 = 270^\circ\text{C}$, 86 mm/s

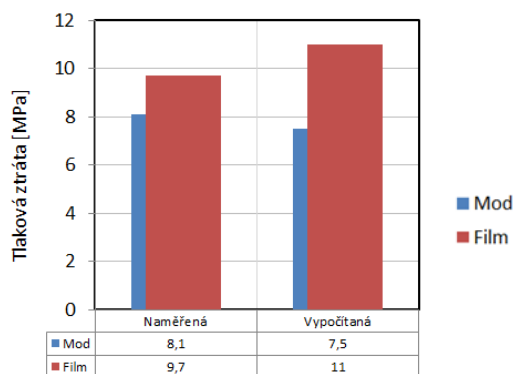


Obr. 181: Tlakový spád, upravený vtok. Moldflow, PC/ABS, 3D mesh, $T_1 = 270^\circ\text{C}$, 86 mm/s

Tlakový spád vypočítaný pomocí numerické analýzy Moldflow má klesající průběh se skokovým poklesem tlaku v oblasti ústí vtoku. Průběh tlaku mezi tlakovými čidly souvisí s geometrií vtoku. Filmový vtok charakterizuje plynulý pokles tlaku, modifikovaný vtok má pokles skokový. Zalomení modifikovaného vtoku odpovídá největšímu poklesu tlaku.

Diskuze výsledků z hlediska tlakových ztrát

V důsledku vnitřního tření a stlačitelnosti viskoelastické kapaliny dochází k poklesu tlaku v dutině formy ve směru toku. K největší tlakové ztrátě dochází v kontrakci ústí vtoku, kde na malé vzdálenosti dochází k největšímu poklesu tlaku. Upravená geometrie vtoku se vyznačuje nižší tlakovou ztrátou ve srovnání s filmovým vtokem. Tlakovými čidly naměřená tlaková ztráta v oblasti ústí modifikovaného vtoku vychází o 17 % menší. Simulací vypočtená tlaková ztráta v oblasti ústí upravené geometrie je o 31 % menší. Hodnoty tlaků z numerické analýzy dosahují větších hodnot, relativně však odpovídají naměřeným hodnotám.



Obr. 182: Tlaková ztráta v oblasti mezi tlakovými čidly

11.2.2 Průběh tlaku v závislosti na vstřikovací rychlosti

Průběh tlaku v závislosti na vstřikovací rychlosti ukazuje rozdíl v chování vtoků při malé a vysoké rychlosti vstřikování. Při velkých smykových rychlostech dominuje teplo získané třením nad odvodem tepla a naopak při malých smykových rychlostech dominuje odvod tepla z ústí vtoku a ústí vtoku je výhodné izolovat.

Principem měření bylo postupné zvyšování vstřikovací rychlosti od 4 mm/s do 160 mm/s. Hodnoty extrémů byly měřeny vždy pětkrát při konstantní vstřikovací rychlosti. Tzn. $n = 5$, $k = 1,4$. Ostatní technologické parametry se neměnily. Z naměřených hodnot byl pro každou rychlost spočítán aritmetický průměr včetně chyby měření.

Zaznamenávala se maximální hodnota naměřeného tlaku, resp. tlak při přepnutí na dotlak.

Tab. 15: Tlak v závislosti na rychlosti, Filmový vtok

Rychlost [mm/s]	číslo cyklu	čidlo č. 1				čidlo č. 2			
		Max. tlak [MPa]	μ [MPa]	δ [%]	$\pm u_a$	Max. tlak [MPa]	μ [MPa]	δ [%]	$\pm u_a$
4	1	36,440	36,433	0,018	0,027	9,336	9,362	0,280	0,020
	2	36,470		0,102		9,337		0,260	
	3	36,329		0,287		9,405		0,466	
	4	36,484		0,138		9,415		0,570	
	5	36,444		0,028		9,315		0,496	
5	6	26,744	26,716	0,104	0,044	10,919	10,912	0,068	0,040
	7	26,659		0,216		10,898		0,126	
	8	26,803		0,324		10,949		0,336	
	9	26,576		0,526		10,773		1,269	



	10	26,800		0,314		11,020		0,992	
7	11	24,007	23,794	0,895	0,082	10,267	10,199	0,659	0,023
	12	23,965		0,716		10,231		0,306	
	13	23,698		0,406		10,150		0,484	
	14	23,722		0,305		10,206		0,062	
	15	23,580		0,900		10,144		0,544	
8	16	22,726	22,720	0,026	0,053	9,805	9,837	0,324	0,019
	17	22,737		0,073		9,874		0,378	
	18	22,702		0,080		9,816		0,216	
	19	22,886		0,731		9,891		0,548	
	20	22,550		0,750		9,799		0,386	
10	21	21,604	21,422	0,850	0,047	9,387	9,347	0,427	0,017
	22	21,412		0,047		9,373		0,276	
	23	21,388		0,160		9,338		0,093	
	24	21,340		0,384		9,291		0,603	
	25	21,367		0,259		9,346		0,007	
15	26	19,984	19,829	0,784	0,048	8,782	8,765	0,191	0,020
	27	19,861		0,164		8,784		0,212	
	28	19,842		0,070		8,813		0,545	
	29	19,736		0,469		8,696		0,787	
	30	19,720		0,549		8,751		0,161	
20	31	19,364	19,196	0,879	0,053	8,609	8,567	0,483	0,018
	32	19,178		0,095		8,550		0,198	
	33	19,092		0,540		8,568		0,009	
	34	19,258		0,323		8,599		0,369	
	35	19,087		0,567		8,511		0,663	
25	36	19,047	18,982	0,340	0,027	8,572	8,567	0,065	0,009
	37	18,911		0,377		8,539		0,325	
	38	19,036		0,284		8,593		0,303	
	39	18,985		0,017		8,574		0,087	
	40	18,932		0,264		8,556		0,130	
30	41	18,745	18,867	0,645	0,055	8,488	8,503	0,186	0,016
	42	18,873		0,034		8,457		0,541	
	43	18,756		0,589		8,551		0,563	
	44	19,039		0,911		8,518		0,174	
	45	18,921		0,289		8,503		0,011	
40	46	18,961	18,933	0,152	0,050	8,622	8,579	0,505	0,032
	47	18,921		0,059		8,558		0,237	
	48	18,985		0,279		8,630		0,598	
	49	19,044		0,589		8,620		0,484	
	50	18,750		0,962		8,463		1,350	
50	51	19,001	19,123	0,634	0,060	8,754	8,727	0,303	0,023
	52	19,199		0,399		8,769		0,474	
	53	19,322		1,042		8,770		0,483	
	54	19,057		0,341		8,691		0,417	
	55	19,033		0,466		8,654		0,843	
60	56	19,484	19,484	0,000	0,047	9,186	9,149	0,408	0,020



	57	19,397		0,450		9,198		0,531	
	58	19,418		0,341		9,150		0,009	
	59	19,487		0,012		9,091		0,638	
	60	19,306		0,916		9,121		0,310	
70	61	19,754	19,851	0,490	0,067	9,422	9,403	0,202	0,029
	62	19,656		0,987		9,319		0,898	
	63	20,013		0,815		9,447		0,463	
	64	19,861		0,048		9,354		0,523	
	65	19,973		0,613		9,474		0,756	
80	66	20,310	20,265	0,221	0,051	9,803	9,955	1,534	0,090
	67	20,096		0,833		9,911		0,448	
	68	20,270		0,023		9,871		0,849	
	69	20,411		0,723		10,309		3,556	
	70	20,238		0,135		9,883		0,724	
90	71	20,491	20,611	0,584	0,060	10,259	10,257	0,027	0,034
	72	20,578		0,161		10,185		0,702	
	73	20,760		0,720		10,333		0,747	
	74	20,481		0,630		10,174		0,801	
	75	20,746		0,655		10,331		0,729	
100	76	20,675	20,775	0,481	0,058	10,354	10,469	1,098	0,029
	77	20,850		0,357		10,476		0,065	
	78	20,878		0,495		10,515		0,434	
	79	20,873		0,471		10,506		0,348	
	80	20,600		0,842		10,495		0,251	
160	81	22,082	22,082	0,000	0,062	11,957	12,036	0,656	0,024
	82	22,256		0,786		12,050		0,115	
	83	22,272		0,858		12,105		0,578	
	84	22,189		0,484		12,031		0,039	
	85	22,084		0,005		12,036		0,002	

Tab. 16: Tlak v závislosti na rychlosti, Modifikovaný vtok

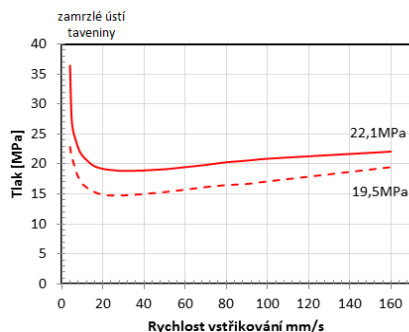
Rychlost [mm/s]	číslo cyklu	číslo č.1				číslo č.2			
		Max. tlak [MPa]	μ [MPa]	δ [%]	$\pm u_a$	Max. tlak [MPa]	μ [MPa]	δ [%]	$\pm u_a$
4	1	19,891	19,838	0,265	0,054	9,132	9,148	0,173	0,041
	2	19,671		0,843		9,101		0,518	
	3	19,783		0,280		9,204		0,612	
	4	19,994		0,788		9,269		1,318	
	5	19,852		0,069		9,035		1,239	
5	6	18,459	18,443	0,088	0,047	8,830	8,932	1,144	0,030
	7	18,305		0,747		9,008		0,856	
	8	18,600		0,852		8,907		0,278	
	9	18,435		0,042		8,956		0,276	
	10	18,415		0,152		8,958		0,291	
7	11	16,528	16,560	0,189	0,081	7,890	7,946	0,714	0,027
	12	16,285		1,656		7,890		0,712	
	13	16,636		0,461		8,035		1,109	



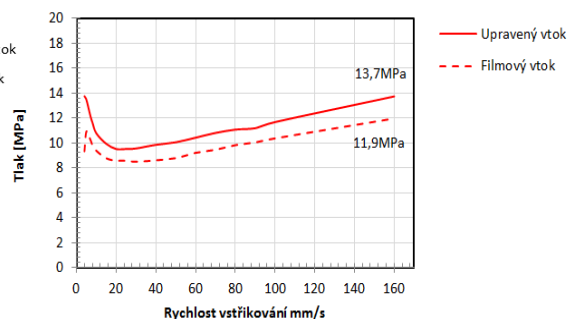
	14	16,785		1,358		7,968		0,276	
	15	16,564		0,026		7,950		0,040	
8	16	16,564	16,597	0,201	0,048	7,563	7,566	0,041	0,023
	17	16,723		0,758		7,502		0,854	
	18	16,449		0,890		7,632		0,874	
	19	16,569		0,171		7,599		0,436	
	20	16,681		0,504		7,535		0,416	
10	21	14,791	14,788	0,023	0,056	6,720	6,745	0,365	0,022
	22	14,867		0,537		6,821		1,141	
	23	14,938		1,014		6,700		0,667	
	24	14,729		0,395		6,759		0,222	
	25	14,613		1,179		6,722		0,330	
15	26	13,850	14,016	1,186	0,070	6,112	6,189	1,248	0,023
	27	14,061		0,317		6,232		0,691	
	28	13,854		1,161		6,209		0,314	
	29	14,137		0,858		6,228		0,629	
	30	14,181		1,172		6,165		0,386	
20	31	13,323	13,221	0,772	0,036	5,941	5,994	0,882	0,020
	32	13,188		0,247		5,987		0,124	
	33	13,187		0,254		5,964		0,499	
	34	13,124		0,729		6,028		0,559	
	35	13,281		0,458		6,051		0,947	
25	36	13,147	13,258	0,842	0,058	6,013	6,073	0,991	0,027
	37	13,285		0,202		6,158		1,397	
	38	13,381		0,928		6,048		0,425	
	39	13,379		0,909		6,036		0,612	
	40	13,100		1,197		6,112		0,630	
30	41	13,387	13,379	0,060	0,042	6,196	6,182	0,229	0,019
	42	13,348		0,234		6,119		1,022	
	43	13,526		1,099		6,239		0,924	
	44	13,363		0,120		6,171		0,168	
	45	13,271		0,804		6,184		0,037	
40	46	13,864	13,832	0,232	0,063	6,261	6,364	1,614	0,033
	47	13,685		1,063		6,340		0,370	
	48	13,868		0,259		6,443		1,239	
	49	13,711		0,873		6,425		0,959	
	50	14,032		1,445		6,350		0,214	
50	51	14,007	14,089	0,584	0,055	6,569	6,566	0,035	0,020
	52	13,980		0,775		6,544		0,335	
	53	14,061		0,198		6,641		1,136	
	54	14,106		0,119		6,531		0,534	
	55	14,292		1,438		6,547		0,302	
60	56	14,782	14,782	0,000	0,064	6,713	6,697	0,235	0,020
	57	14,653		0,871		6,740		0,648	
	58	14,587		1,317		6,710		0,194	
	59	14,841		0,400		6,624		1,088	
	60	14,938		1,061		6,698		0,011	

70	61	14,867	14,999	0,884	0,048	7,252	7,249	0,040	0,028
	62	15,115		0,774		7,214		0,478	
	63	14,974		0,168		7,351		1,406	
	64	15,102		0,685		7,243		0,087	
	65	14,938		0,408		7,185		0,881	
80	66	15,596	15,643	0,298	0,061	7,632	7,697	0,852	0,033
	67	15,687		0,281		7,724		0,348	
	68	15,560		0,530		7,787		1,160	
	69	15,857		1,370		7,612		1,110	
	70	15,514		0,823		7,732		0,454	
90	71	15,828	15,845	0,106	0,064	7,899	7,934	0,436	0,023
	72	15,650		1,230		7,896		0,475	
	73	15,795		0,314		7,998		0,803	
	74	15,917		0,456		7,980		0,578	
	75	16,034		1,194		7,897		0,470	
100	76	16,278	16,327	0,304	0,079	8,231	8,210	0,254	0,016
	77	16,299		0,173		8,155		0,672	
	78	16,101		1,384		8,246		0,434	
	79	16,369		0,257		8,202		0,105	
	80	16,589		1,604		8,218		0,089	
160	81	18,347	18,347	0,000	0,059	9,963	9,995	0,322	0,028
	82	18,434		0,478		10,030		0,350	
	83	18,166		0,983		10,081		0,857	
	84	18,178		0,918		9,920		0,750	
	85	18,355		0,048		9,982		0,134	

Při malé vstřikovací rychlosti 4 mm/s došlo u filmového vtoku k celkovému zamrznutí ústí vtoku a tlak vzrostl na vysokou hodnotu. Vyšší tlak při takto malé rychlosti modifikované geometrie ukazuje na částečné zamrznutí vtoku. Se zvyšováním rychlosti vstřiku dochází u obou vtoků k poklesu tlaku.



Obr. 184: Průběh tlaku v závislosti na rychlosti vstřikování pro filmový a upravený vtok. Hodnota tlaku odpovídá tlakové špičce. Měřeno na čidle č.1 (před ústím vtoku). $T_f = 70^\circ\text{C}$, $T_i = 270^\circ\text{C}$, přepnutí na dotlak 21 mm, dávka 43 mm, \varnothing 22 mm.



Obr. 183: Průběh tlaku v závislosti na rychlosti vstřikování pro filmový a upravený vtok. Hodnota tlaku odpovídá tlakové špičce. Měřeno na čidle č.2 (za ústím vtoku). $T_f = 70^\circ\text{C}$, $T_i = 270^\circ\text{C}$, přepnutí na dotlak 21 mm, dávka 43 mm, \varnothing 22 mm.

Při dostatečné rychlosti tečení, třecí teplo vyrovná odvod tepla v oblasti ústí vtoku a tlak v dutině formy opět roste. Nárůst tlaku již není způsoben zamrznutím ústí vtoku, ale zvyšujícím se odporem taveniny.

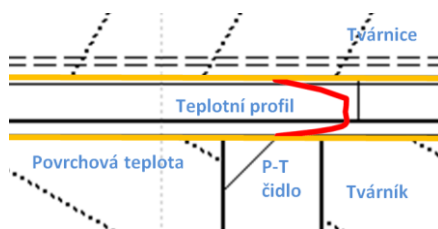
Izolační vlastnosti modifikované geometrie zlepšují oblouky před ústím vtoku, vtok je tak vhodný při aplikacích, kdy je nutné dodržet velice pomalou rychlost toku, aniž by došlo k brzkému zamrznutí ústí vtoku.

Diskuze výsledků z hlediska tlaku při různých vstřikovacích rychlostech

V této kapitole byly měřeny tlakové extrémy v závislosti na rychlosti vstřikování. Tlak taveniny před ústím upraveného vtoku je v celém rozsahu vstřikovací rychlosti menší o přibližně 12 %. Za ústím vtoku je tlak taveniny v celém rozsahu vstřikovací rychlosti větší o 13 %. Upravená geometrie má lepší izolační vlastnosti a díky tomu zamrzá ústí vtoku pomaleji. Při malých vstřikovacích rychlostech nevyrovnává třecí teplo odvod tepla stěnou formy a dochází k zamrznutí ústí vtoku, se zvyšující se rychlostí roste vliv třecího tepla a viskozita klesá s rostoucí smykovou rychlostí.

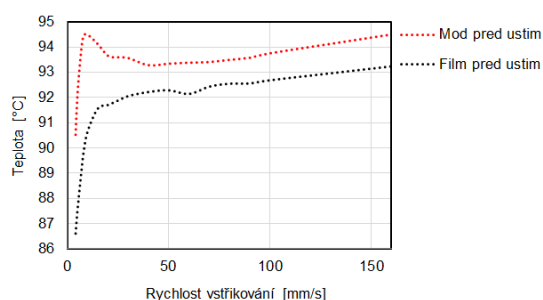
11.2.3 Průběh povrchové teploty při rozdílných vstřikovacích rychlostech

Povrchová teplota formy je dána tepelnou bilancí systému a v průběhu vstřikovacího procesu má plynule klesající tendenci. Povrchová teplota, měřená kombinovanými p-T čidly umístěnými ve zkušební formě, byla měřená při různých vstřikovacích rychlostech obou vtoků. Rychlost vstřiku byla volena mezi 4-160 mm/s rychlosti šneku vstřikovacího stroje ($\varnothing 22$). Podmínky vstřikování byly stejné jako při měření tlaku v dutině formy. Povrchová teplota má v závislosti na rychlosti tečení nelineárně rostoucí tendenci a vytváří ji třecí teplo v povrchové vrstvě.

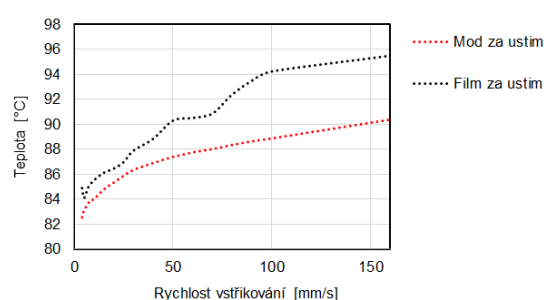


Obr. 185: Schéma měření povrchové teploty zabudovaného p-T čidla Kistler,

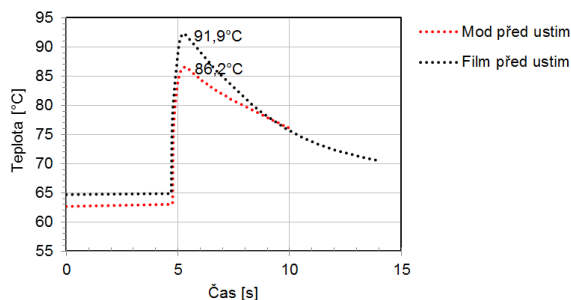
Povrchová teplota taveniny před ústím vtoku je téměř totožná u obou typů vtoku. Výrazný rozdíl teploty při malé rychlosti tečení je dán dřívějším zamrznutím ústí filmového vtoku. Průběh povrchové teploty obou vtoků za ústím vtoku je různý a povrchová teplota filmového vtoku roste v závislosti na rychlosti toku rychleji než teplota modifikovaného vtoku. Vyšší teplotu filmového vtoku lze vysvětlit větším třecím teplem v oblasti ústí vtoku. Podle simulace, použité při výpočtu průběhu tlaku, je smyková rychlost v oblasti p-T čidla pro oba vtoky stejná. K nárůstu teploty tak musí dojít v oblasti ústí vtoku.



Obr. 187: Povrchová teplota před ústím vtoku pro modifikovaný (Mod) a filmový (Film) vtok v závislosti na rychlosti toku



Obr. 186: Povrchová teplota za ústím vtoku pro modifikovaný (Mod) a filmový (Film) vtok v závislosti na rychlosti toku



Obr. 188: Průběh povrchové teploty během vstřiku před ústím vtoku pro modifikovaný (Mod) a filmový (Film) vtok

Větší objem třecího tepla vykazuje filmový vtok, je to způsobené větší délkou kontrakce, ve které dochází ke tření. Z numerické analýzy víme, že k největšímu třecímu teple dochází v oblasti břitu modifikovaného vtoku, ale vzniká pouze lokálně ve srovnání s filmovým vtokem, kde k tření dochází podél celého ztenčení.

Diskuze výsledků z hlediska povrchové teploty

Povrchová teplota před ústím vtoku je o 1,5 % vyšší přibližně v celém rozsahu. Za ústím vtoku je povrchová teplota nižší o 2 % při rychlosti 10 mm/s a o 6 % při rychlosti 150 mm/s. Objem vzniklého třecího tepla za ústím modifikovaného vtoku je menší. Vzhledem k přímé souvislosti smykové rychlosti a třecího tepla, lze konstatovat, že i smyková rychlost je v průběhu toku průměrně nižší u modifikované geometrie.

12 Nestabilita viskoelastického toku

Nestabilita viskoelastického toku má v průmyslových aplikacích jako je vytlačování, vyfukování a vstřikování negativní vliv na kvalitu výrobku a následně na ekonomiku procesu. Nestabilita toku způsobuje vady jako vrásnění (shark skin), tygr efekt, různé změny lesku, tokové čáry, atd. Tyto vady se týkají všech materiálů jako LDPE, HDPE, PP, PC/ABS, ASA, PS, PMMA, POM, PVC atd. V praktických situacích způsobují znehodnocení dezénovaných výrobků, lakovaných výrobků nebo výrobků kde je kladen důraz na transparentnost a odstranění efektu barevných šmouh v polarizovaném světle. Tok materiálu provází viskózní a elastické napětí, resp. orientování a natahování makromolekul do směru toku. U viskoelastických kapalin, vlivem polymerní struktury shluků makromolekul, dále dochází k rozdílu normálových napětí a relaxaci. Chladnutím taveniny zůstávají makromolekuly ve svých nestabilních polohách a vlivem vnitřních sil vnášejí do systému vnitřní napětí.

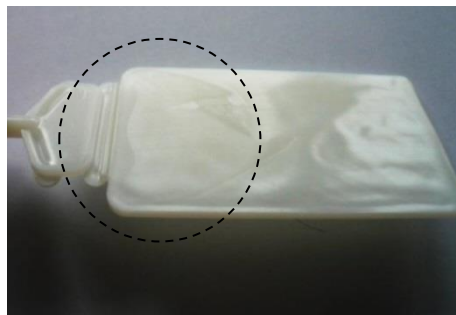
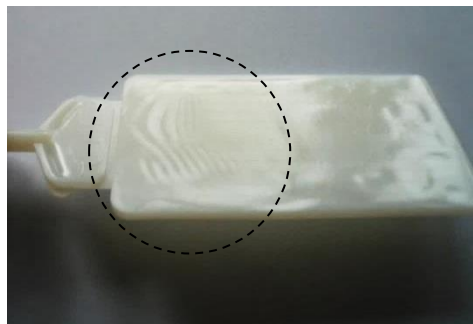
Nestabilitou toku se podrobně zabývají autoři několik desetiletí, např. (Grilled⁵³), (Chang³⁰) zjistil, že menší vady při toku materiálu vykazují materiály s nižší dobou relaxace. Pro numerický výpočet Grilled použil XPP viskoelastický model. Grilled a Chang zjistili, že při toku taveniny dochází ke střídavému zpomalení horní nebo dolní části fontánového toku a vzniku střídavých tokových čar na povrchu (obr. 189). Někteří autoři jako (Denn, 2001⁵⁵) to přisuzují pohybu zamrzlé vrstvy na povrchu formy.

Obr. 189: Kinematika tvorby nestability fontánového toku viskoelastické kapaliny kanálem ⁵³

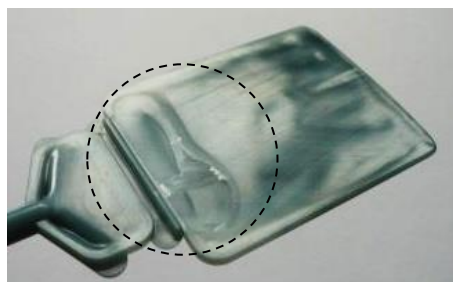
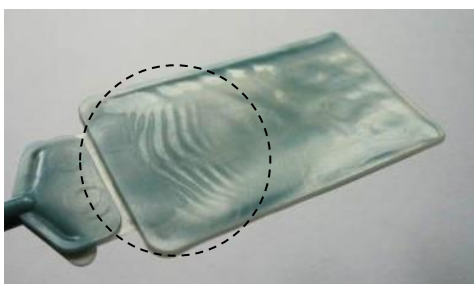
Určení přesných příčin nebo jejich simulace je velice obtížné a prozatím prakticky nemožné. Skutečné vlastnosti viskoelastických kapalin při teplotně-kinematických podmínkách vstřikování zahrnují širokou oblast vědeckého výzkumu se složitým a dosud ne zcela pochopeným dějem. Pro přesnou numerickou analýzu by výpočet znamenal 3D výpočet s objemovým tokem, elasticitou, historií toku, ne-izotermickým dějem a zohlednění morfologie materiálu. Získat všechna data materiálu v souvislosti se smykovou rychlostí a teplotou, jako jsou smyková a tahová viskozita, moduly pružnosti v tahu a smyku, rozdíl normálových napětí, tepelná vodivost atd. znamená dlouhodobou vědeckou činnost znamenající desítky různých měření a vyhodnocení a vysoké nároky na vybavení.

Diskuze výsledků z hlediska nestability

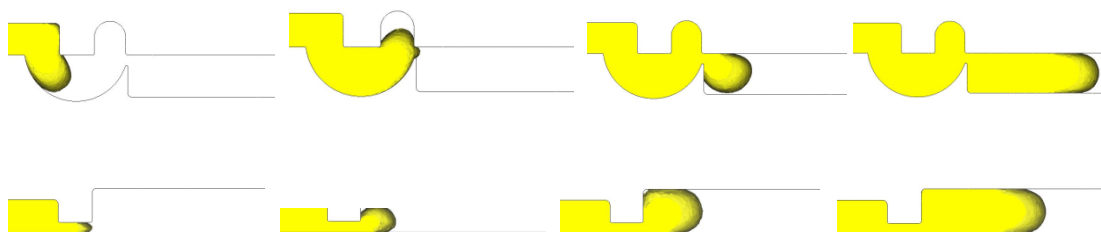
Při plnění zkušebního tělíska vysokými rychlostmi při nízké teplotě taveniny došlo, u obou materiálů PC/ABS a PP, v povrchové vrstvě k různým vadám způsobených nestabilitou toku. Filmový vtok vykazoval střídavě se vyskytující tokové čáry daleko od ústí vtoku. Vtok s modifikovanou geometrií vykazoval zmatnění povrchové vrstvy blízko ústí vtoku nebo jednotné odtržení povrchové vrstvy z jedné strany vzorku. Jednotlivé vtoky vykazovaly stejnou vadu při použití materiálů PP a PC/ABS (obr. 190-191). Všechny zkoušky proběhly za stejných podmínek a geometrie tak hraje významnou roli při nestabilitě tečení viskoelastické kapaliny, způsobující vzhledové vady v povrchové vrstvě. To má z praktického hlediska vliv na navrhování a použití vtoků pro vzhledové plastové díly. Jinak řečeno, povrchovou vadu může ovlivnit výběr vtoku podobně jako výběr materiálu, tloušťky stěny, tvaru dílu a technologických parametrů.



Obr. 190: Vzhledová vada po plnění filmovým (vlevo) a modifikovaným vtokem (vpravo) po vstřikování PC/ABS, $T_t = 270^\circ\text{C}$, $T_f = 70^\circ\text{C}$, čas vstřiku 0,2 s



Obr. 191: Vzhledová vada po plnění filmovým (vlevo) a modifikovaným vtokem (vpravo) po vstřikování PP, $T_t = 240^\circ\text{C}$, $T_f = 40^\circ\text{C}$, čas vstřiku 0,2 s



Obr. 192: Průběh plnění ne-izotermického GNF VOF modelu, materiál PC/ABS Pulse A35-105, Zanedbáním viskoelasticity nedochází k nestabilitě toku a souvisejícím vadám. To se týká softwarů jako Moldflow, Moldex 3D, Cadmould, atd.

13 Diskuze výsledků disertační práce

Oblast ústí vtoku lze teoreticky popsat jako kontrakci kanálu a vstřikování polymerů jako ne-izotermický tok viskoelastické kapaliny.

V oblasti ústí vtoku často dochází k největšímu smykovému a normálovému namáhání pohybujících se makromolekul. Napětí je popsáno tensorem napětí a souvisí s gradientem rychlosti a viskozitou taveniny. Spolu s hydrostatickým tlakem určuje celkové napětí v tavenině. Smyková rychlost vznikající v povrchové vrstvě způsobuje ohřev materiálu a vysoká teplota může lokálně způsobit degradaci materiálu, projevující se např. stříbřením. Kontrakce ústí vtoku může způsobit různá víření nebo jetting, proto by v oblasti ústí vtoku měly být voleny spíše pozvolné změny průřezu bez ostrých hran. Ostré hrany na druhou stranu usnadňují odtržení vtoku od dílu a mělo by dojít ke kompromisu. Materiály jako PC/ABS se používají u vzhledových i nevzhledových dílů a při plnění může docházet k nestabilitě viskoelastického toku způsobující nežádoucí tygr efekt nebo různá zmatnění.

Výběrem správného vtoku lze ovlivnit kvalitu výrobku z hlediska vzhledu i mechanických vlastností. Velikost vtoku a míra zmetkovitosti výroby pak ovlivňuje ekonomičnost výroby. Pro speciální aplikace a materiály se specifickými vlastnostmi je vhodné navrhnout nový vtok nebo modifikovat některý ze stávajících vtoků a docílit žádaných vlastností. Mezi tyto vlastnosti vtoku může patřit velikost vnitřního pnutí v materiálu, stabilita toku, zamezení vzniku třecího tepla, velikost stopy po vtoku, doba působení dotlaku, snadné odstranění vtoku od zbytku dílu, nízké náklady na odpad, umístění a zaformování vtoku.

13.1 Přínosy disertační práce

V rámci předkládané disertační práce jsou shrnuty obecné přínosy pro oblast vědy a výzkumu a přínosy pro praktické aplikace v oblasti průmyslové výroby.

- Byla navržena a realizována nová geometrie vtoku. Vtok lze využít v technologii vstřikování při vstřikování materiálů citlivých na smykové namáhání s požadavkem na snadné odlomení vtoku od výrobku a zároveň malou stopou po vtoku. Nebo tam, kde je nutná delší doba dotlaku než u standardního filmového vtoku. Jednou z výhod geometrie je malá hydraulická ztráta v oblasti ústí vtoku, snadná výroba a čistota stopy vtoku po odtržení. Uvedená geometrie vtoku je chráněna užitným vzorem CZ 27475 U1.
- Byl proveden popis dějů v průběhu toku čistě viskózní a viskoelastické kapaliny kontrakcí ústí vtoku při rychlostech odpovídajících technologii vstřikování. Základem bylo měření doby zamrznutí ústí vtoku a průběh tlaků v dutině formy a numerický výpočet pomocí GNF (Generalized Newtonian Flow) modelu. V práci jsou podrobně popsány souvislosti mezi smykovou rychlostí, viskozitou, teplotou, třením, tlakem a napětím v podobě tensoru napětí.
- Bylo popsáno napětí v podobě celkového tensoru napětí T v oblasti kontrakce ústí vtoku při viskoelastickém toku a rychlostech odpovídajících technologii vstřikování. Byl použit izotermický PTT (Phan-Thien-Tanner) numerický model.
- Byla navržena a realizována vstřikovací forma umožňující současné plnění zkušebních tělísek filmovým a nově navrženým vtokem. Vstřikovací forma umožňuje měření tlaku a povrchové teploty v dutině formy v průběhu vstřikování, což přináší potřebné poznatky pro průmyslovou praxi z hlediska parametrizace procesu ve vztahu k nově navržené geometrii vtoku.



- Bylo provedeno vizuální srovnání stability toku po průchodu taveniny filmovým a nově navrženým vtokem z hlediska konečných vlastností.

14 Závěr

Diskuze dílčích výsledků jsou uvedeny v průběhu disertační práce vždy na konci jednotlivých kapitol. V této kapitole dojde podrobněji ke zhodnocení práce jako celku na základě jednotlivých cílů. V průběhu disertační práce byly popsány, analyzovány a vyhodnoceny dříve uvedené cíle, a to v rozsahu omezeném disertační prací. Reologie jako vědní obor mechaniky kontinua je značně široký.

Popis návrhu vhodné geometrie pro polymerní materiál PC/ABS včetně popisu jednotlivých částí a jejich funkcí je podrobně uveden v kapitole 4. V příloze A lze najít výkresy modifikované geometrie vtoku včetně varianty vtoku pro plnění trubkových tvarů. Geometrie vtoku je zcela nová a jedinečná v oblasti ústí vtoku, zbývající část vychází z filmového vtoku.

Rešerše odborné a patentové literatury dosavadních vtokových soustav se vyskytuje v kapitole 2, rešerše odborné literatury toku viskoelastických kapalin se vyskytuje v kapitole 5, 6 a rešerše výpočetních modelů se vyskytuje v kapitole 9.

Teoretický rozbor celkového tensoru napětí byl rozdělen na část s čistě viskózním tokem při izotermickém a ne-izotermickém ději v kapitole 13.3.2 a část s izotermickým viskoelastickým dějem předloženém v kapitole 13.3.3. Rozdělení výpočtu tensoru napětí na část s čistě viskózním tokem a část s viskoelastickým tokem umožnilo získat představu o vlivu dočasných elastických deformací na tok kontrakcí při vysokých smykových rychlostech. Ten odpovídá teoretickému předpokladu a viskoelastická v oblasti ústí vtoku se projevuje zpožděnou reakcí toku. Tensor napětí je deformován do směru toku v závislosti na rychlosti toku a času relaxace, obr. 133-134, kap. 10.3.3.1. Nelze zcela porovnávat výsledky z čistě viskózního toku a viskoelastického toku, protože oba výpočty vznikly na základě zcela jiného výpočetního modelu. Výpočet izotermického a ne-izotermického děje čistě viskózního toku umožnil získat vliv odvodu tepla na tensor napětí. Ne-izotermický výpočet viskoelastického toku nebyl proveden z důvodu nestability (problém s konvergencí) numerického výpočtu, ten bez získání

přesných koeficientů vícestupňového PTT modelu nelze spočítat. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno pouze k výpočtu izotermického modelu.

Pomocí simulační analýzy v softwarech Moldflow a Ansys Polyflow byl proveden teoretický rozbor oblasti ústí vtoku uvedený v kapitolách 10.1 a 10.2. Některé výsledky simulačních analýz byly ověřeny praktickou zkouškou. Výpočet izotermického a ne-izotermického děje umožnil porovnat vliv tepelné výměny na oblast ústí vtoku. Z výsledků vyplývají lepší izolační vlastnosti nově navržené geometrie ve srovnání s filmovým vtokem. Zkouška vážení zkušebních tělísek v závislosti na době dotlaku tento předpoklad potvrdila. To má vliv především ve fází dotlaku a při nízkých rychlostech toku. Simulační analýza poukázala na přímý vliv smykové rychlosti na třecí teplo. Oblast smykové rychlosti se posouvá v závislosti na odvodu tepla a tvorbě zamrzlé vrstvy.

Konstrukční návrh vstřikovací formy a její funkční popis je uveden v kapitole 11. V příloze B lze najít konstrukční výkresovou dokumentaci jednotlivých částí. Forma byla zkonstruována v rámci disertační práce a po dodání dokumentace vyrobena firmou Jinova s.r.o. a odzkoušena na vstřikovacím stroji Engel. Měřicí sensory byly dodány firmou Kistler.

V kapitole 11 došlo k měření průběhu tlaku v dutině formy před a za ústím vtoku. K měření byla použita vstřikovací forma popsaná v kapitole 11.1 a materiál PC/ABS Pulse A35-110 a PP Mosten. Měření tlaků proběhlo v celém rozsahu vstřikovacích rychlostí nastavitelných na vstřikovacím stroji Engel. Upravená geometrie vtoku se vyznačuje nižším hydraulickým odporem v celém rozsahu rychlostí. Provedená simulace v softwaru Moldflow se shoduje s výsledky měření. Nižší ztráta je dána izolačními vlastnostmi vtoku a minimální délkou zúžené části ústí vtoku. V kapitole 12 je popsáno vizuální porovnání zkušebních tělísek z hlediska stability toku. Vstřikování proběhlo velice vysokými rychlostmi při nízkých teplotách taveniny. Oba vtoky vykazují cyklickou nestabilitu toku, subjektivně vykazuje vyšší nestabilitu toku zkušební tělísko plněné filmovým vtokem. Vzhledem ke stejným technologickým podmínkám při plnění a totožné velikosti a tvaru ústí obou vtoků, lze konstatovat vliv tvaru vtoku na stabilitu viskoelastického toku.

15 Doporučené pokračování disertační práce

- Stanovení tahové viskozity pro různé materiály v celém poli smykových rychlostí a při různých teplotách by umožnilo upřesnění koeficientů viskoelastických modelů. Matematické modely jsou navrhovány různými matematickými procesy, ale často nezohledňují skutečné vlastnosti toku tavenin polymerů. Stanovení koeficientů v širokém poli teplot a smykových rychlostí by umožnilo ne-izotermický výpočet pro některý z viskoelastických modelů.
- Měřením napětí toku tavenin polymerů by bylo možné ověřit správnost některého ne-izotermického modelu. Pro tento experiment by měla vzniknout nová vstřikovací forma umožňující sledování toku materiálu a napěťových polí. Zároveň by bylo potřeba připojit vysokorychlostní kameru zaznamenávající tok taveniny při vstřikování. Napětí při toku taveniny lze také ověřit kapacitními sensory zaznamenávající změnu kapacity. Tyto sensory nelze volně koupit, ale musejí se speciálně vyrobit. Toto měření se nehodí pro oblast ústí vtoku, která je příliš malá.

Oblast viskoelastického toku při vysokých rychlostech je stále zcela neobjasněná, třebaže je podrobně zkoumaná již více než 40 let.

Literatura

1. BEAUMONT, J. P. *Runner and Gating Design Handbook*. 2nd ed. Hanser Publishers. ISBN 1-56990-421-3
2. BEAUMONT, J. P., NAGEL, R., SHERMAN, R. *Successful Injection Molding*, Munich: Hanser Publishers, 2002. ISBN 3-446-19433-9
3. TECHNIK, J. *Influence of chisel gate modification on rheological properties*, ERIN 2011
4. ŠAFAŘÍK, M. *Nástroje pro tváření kovů a plastů – cvičení*, Liberec: TUL, 1991
5. BRYDSON, J. A. *Plastics Materials*. 7th ed. Elsevier, 1999. ISBN 0-7506-4132-0
6. SHOEMAKER, J. *Moldflow Design Guide*. Hanser Publishers, 2006. ISBN 978-1-56990-403-9
7. TECHNIK J., LENFELD P. *Geometrie vtoku pro materiály citlivé na smykové namáhání*. Užité vzor, CZ 27475 U1. 2014-11-18.
Dostupné také z:
<http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0027/uv027475.pdf>
8. BRITO, A. M., CUNHA, A. M., POUZADA, A. S. *Predicting the Skin-Core Boundary Location in Injection Moldings*. Intern. Polymer Processing VI. Hanser Publishers, Munich, 1991.
9. KREBS, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: TUL, 2001
10. MEISSNER, B., ZILVAR. V. *Fyzika polymeru, struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. Brno: VUTB, 1987
11. TADMOR, Z., GOGOS, C. *Principles of polymer processing*. 2nd. ed. Wiley, 2006. ISBN 978-0471387701
12. WEST, G. D. *On the resistance to the motion of a thread of mercury in a glass tube*. Proc. Roy. Soc. London, 1911, str. 20–25.
13. COYLE, D. J., BLAKE, J. W. C., MACOSKO, W. *The kinematics of fountain flow in mold filling*. AIChE 33, 1987, str. 1168–1177.
14. BALTUSSEN M. G. H. M., HULSEN M. A., PETERS G. W. M. *Numerical simulation of the fountain flow instability in injection*

- molding*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2010, volume 165, issues 11-12, str. 631-640
15. Anom. *Vstřikování termoplastů*. Šmíd a spol., s.r.o., Úholice
 16. ASKADSKII A. A. *Computational material science of polymers*, Cambridge International Science, 2003. ISBN 978-1898326625
 17. MARK J. E. *Physical properties of polymers handbook*. Springer, 2007. ISBN 13:978-0-387-31235-4
 18. VAN KRELEVEN D. W. *Properties of polymers*. 4th ed. Elsevier, 2009. ISBN 0-444-88160
 19. BEJAN A., KRAUS A. D. *Heat transfer handbook*. Wiley, 2003. ISBN 978-0-471-39015-2
 20. NECATI OZISIK M. *Heat conduction*. 2nd ed. Wiley, 1993. ISBN 0-471-53256-8
 21. ROHSENOW, W., HARTNETT J. P., Y. I. CHO. *Handbook of heat transfer*. 3th ed. McGraw-Hill Professional, 1998. ISBN 978-0070535558
 22. SKELLAND A. H. P. *Non-newtonian fluid and heat transfer*. Wiley, 1967. 66025230
 23. BIRD R. B., ARMSTRONG R. C., HASSAGER O. *Dynamics of polymeric Liquids*. Volume 1. 2nd ed. Wiley, 1987. ISBN 0-471-80245-X
 24. HERNANDEZ J. P., *Polymer Processing – Modeling & Simulation*. Hanser Publishing, 2006. ISBN-13: 978-1569903988
 25. TECHNIK J., POUZADA A. S., MARTINS C. I. *Skin effect of polypropylene in dependence on flow rate and heat conductivity by use hybrid mould*. Conference in Guimaraes, Portugal
 26. PENG Y., HAIMEI LI, LIH-SHENG TURNG. *Development of a Rheo-Dielectric Sensor for Online Shear Stress Measurement During the Injection Molding Process*. Polymer Engineering & Science, Volume 50, Issue 1, pages 61–68, January 2010
 27. PENG Y., YURI M. SHKEL. *Stress dielectric response in liquid polymers*. Journal of Rheology / Volume 49 / Issue 1
 28. RONALD M. H. *Coloring technology for plastic*. William Andrew, 2000. ISBN 1-884207-78-2

29. ASTARITA, MARRUCCI. *Principles of non-Newtonian fluid mechanics*. McGraw-Hill, 1974. ISBN 0-07-084022-9
30. CHANG DAE HAN. *Rheology and processing of polymeric materials*. volume 1, 2, ISBN: 978-0-19-518782-3 (vol. 1); 978-0-19-518783-0 (vol. 2)
31. HATZIKIRIAKOS S. G., MIGLER K. B. *Polymer Processing Instabilities*. Marcel Dekker, 2005. ISBN: 0-8247-5386-0
32. GROISMAN, STEINBERG. *Elastic turbulence in a polymer solution flow*. Nature 2000, 405, 53–55.
33. HOWARD A. B. *Handbook of Elementary Rheology*. University of Wales, 2000. ISBN 0-9538032-0-1
34. JANALÍK J., ŠTÁVA P. *Mechanika tekutin*. Ostrava, VŠB TU Ostrava
35. MARK H. F. *Encyclopedia of polymer Science and Technology*. 4th ed. Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-63389-2
36. DELMARCELLE T., HESSELINK L. *Visualizing second-order tensor fields with hyperstreamlines*. Computer Graphics and Applications, 13(4):25–33, July 1993. ISSN 0272-1716
37. TADMOR Z. *Molecular orientation in Injection Molding*. Wiley, Journal of Applied Polymer Science. Volume 18, Issue 6, 1974.
38. SCHOONEN J. *Determination of rheological constitutive equations using complex flow*. Rosmalen, 1998
39. Anom. *Calculation of the relaxation time(s) and the relaxation time spectrum $H(\lambda)$ of a Polypropylene melt*. [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://anton-paar-rheology.com/resources/Calculation%20of%20the%20relaxation%20time%20s%29%20and%20the%20relaxation%20time.pdf>
40. RONG, ZHENG, TANNER. *Injection molding Integration of theory and modeling methods*. Berlin: Springer, 2011. e-ISBN 978-3-642-21263-5
41. RIANDE, CALLEJA, PROLONGO, MASEGOSA, SALOM. *Polymer Viscoelasticity Stress and strain in practice*. New York: Marcel Dekker, INC., 2000. ISBN 0-8247-7904-5
42. NHAN PHAN TIEN. *Understanding viscoelasticity: Basic of rheology*. Berlin: Springer, 2002. ISBN 978-3-642-07779-1

43. MARK, S., ALGER, M., *Polymeric Science Dictionary*. 2nd ed. Chapman & Hall, 1997. ISBN 0-412-60870-7
44. TROPEA C., YARIN A. L., FOSS J. F. *Handbook of experimental fluid mechanics*. Springer, 2007. e-ISBN 978-3-540-30299-5
45. LARSON, R. G. *Constitutive equations for polymer melts and solutions*. Boston: Butterworths, 1988. ISBN 0-409-90119-9
46. VERBEETEN, W.M.H., PETERS G.W.M., BAAIJENS F.P.T. *Numerical simulations of the planar contraction for a polyethylene melt using the XPP model*. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 117:73-84, 2004
47. FRANCK, A. J. *Normal stresses in shear flow*. TA Instruments [cit. 2015-03-08]. Dostupné z:
http://www.tainstruments.com.cn/library_download.aspx?file=AAN007e_Normal_forces_in_Shear_flow.pdf
48. SCHWEIZER, T, VAN MEERVELD, J., ÖTTINGER. *Nonlinear shear rheology of polystyrene melt with narrow molecular weight distribution—experiment and theory*. Journal of Rheol. 48:1345–1363
49. HUIGOL, R. R., PHAN-THIEN N. *Fluid Mechanics of Viscoelasticity*. Elsevier, 1997. ISBN 0-444-82661-0
50. VERBEETEN, W. M. H., PETERS, G. W. M., BAAIJENS, F. P. T. *Viscoelastic analysis of complex polymer melt flows using the eXtended Pom–Pom model*, Journal of Non-Newtonian Fluid Mech. 108 (2002) 301–326
51. PIVOKONSKY, R., ZATLOUKAL, M., FILIP, P. *On the predictive/fitting capabilities of the advanced differential constitutive equations for linear polyethylene melts*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mech. 150 (2008) 56–64
52. GUCNETTE R., FORTIN M. *A new mixed finite element method for computing viscoelastic flows*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mech., 60 (1995) 27-52
53. GRILLET, A. M., BOGAERDS, A. C. B., PETERS, G. W. M., BAAIJENS, F. P. T. *Numerical analysis of flow mark surface defects in injection molding flow*. Shanghai, China: Proceedings of the 16th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, 2000

54. Anon. *Ansys Polyflow User's Guide*. Southpointe USA: 2012, Release 14.5
55. DENN, M. M. *Extrusion instabilities and wall slip*. Annu. Rev. Fluid Mech. 2001, 33, 265-287
56. HAN C., VILLAMIZAR C. *Development of stress birefringence and flow patterns during mold filling and cooling*. Polymer Engineering and Science, 18, 1978.
57. WHITE S., BAIRD D. *Flow visualization and birefringence studies on planar entry flow behavior of polymer melts*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 29, 1988.
58. BRESS, DOWLING. *Visualization of injection molding*. Journal of reinforced plastics and composites, vol. 17, no. 15/1998
59. LEONOV A. I., PROKUNIN A. N. *Nonlinear phenomena in flows of viscoelastic polymers fluids*. 1994, ISBN 0 412 58200 7
60. HELLWEGE K. H., HENNIG J., KNAPPE W. *Anisotropie der Warmausdehnung und Wärmeleitung in einachsig versteckten amorphen Hochpolymeren*. Kolloid-Z.188, 121–127, 1963
61. WALTERS K., WEBSTER M. F. *The distinctive CFD challenges of computational rheology*. Wales UK, ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference, 2001.
62. FAN Y., TANNER R. I., PHAN-THIEN N. *Galerkin/least-square finite-element methods for steady viscoelastic flows*. Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics - vol. 84, no. 2, str. 233-256, 1999
63. ROSENBAUM E. E., HATZIKIRIAKOS S. G. *Wall slip in the Capillary Flow of Molten Polymers Subject to Viscous Heating*. AIChE Journal, vol. 43, No. 3, 1997
64. HUAMIN Z. *Computer Modeling for Injection Molding*. New Jersey: Wiley, 2013. ISBN 978-0-470-60299-7
65. MÜNSTEDT H. *Dependence of the Elongational Behavior of Polystyrene Melts on Molecular Weight and Molecular Weight Distribution*. Wiley, 1980, Journal of Rheology, 847-867
66. BAGLEY, E. B., BIRKS A. M. *Flow of polyethylene into a capillary*. J. Appl. Phys, 1960, 31,556-561



67. BOGER, D. V., WALTERS, K., *Rheological phenomena in Focus*, New York: Elsevier, 1993, 35-72
68. BALTUSSEN M. G. H. M. *Viscoelastic flow effects in high speed injection moulding*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2006
69. RAMAMURTHY A. V. *Wall slip in viscous fluids and influence of materials of construction*. 1986, Journal of Rheology, 30, 337–357.

Publikační činnost

1. TECHNIK, J., SEIDL, M., PACLT, R. *Analyzing of cooling into real cover of headlamp*. In: CD s recenzovanými příspěvky z Mezinárodní Baťovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2009. Zlín, duben 2009, ČR, ISBN 978-80-7318-812-2.
2. TECHNIK, J. *Gates effect on melt pressure in mold cavity*. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, 15. 4. 2010, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7318-922-8 (CD)
3. TECHNIK J. *Anisotropic shrinkage by semicrystalline polymers*. In: ERIN 2010, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 16-17.3.2010, Plzeň, ČR, ISBN 978-80-7043-866-4 (CD)
4. TECHNIK J., PACLT R. *Balancing of runner system of car plastic grille*. In: 11. Mezinárodní konference TECHNOLOGIA 200, 9-10.9.2009 Bratislava, SR, str. 79, sekce 5, ISBN 978-80-227-3135-5
5. TECHNIK J. *Injection mold cooling configuration*. In: 9. Mezinárodná vedecká konferencia TSO 09, 5.-6. November 2009, PREŠOV, SR, ISBN 978-80-553-0312-3
6. TECHNIK, J. *Asymmetric melt conditions*. In: Sborník mezinárodní konference „MITECH 09“ Praha, červen 2009, ČR, str. 306-308, ISBN 978-80-213-1931-8
7. PACLT, R., SEIDL M., TECHNIK J. *Modern procedures in injection mould manufacturing*. Recenzované CD abstraktů mezinárodní Baťovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, 2. dubna 2009, ISBN 978-80-7318-811
8. TECHNIK, J. *Freeze time of a fan gate*. In: 13th. International scientific conference, ME2010, 21.10.2010 Bratislava, SR, str.119-123, sekce 5, ISBN 978-80-227-3304-5
9. TECHNIK, J. *Warping simulation of plastic part*. In: 13th. International scientific conference, ME2010, 21.10.2010 Bratislava, SR, str.124-129, sekce 5, ISBN 978-80-227-3304-5
10. TECHNIK, J. *Melt pressure and temperature behavior on fan gate*. In: Mezinárodní Baťova konference 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ISBN 978-80-7454-013-4.



11. TECHNIK, J. *Influence of chisel gate modification on rheological properties*. In: ERIN 2011, 13-16 Duben 2011, Slovakia, str. 371-376, ISBN 978-80-89347-05-6
12. TECHNIK, J., BRITO, A. M., POUZADA, A. S., MARTINS, C. I. *Influence of the injection rate and mould block material of hybrid moulds on the morphological development of PP parts*. In: poster presentation in VI International Materials Symposium MATERIAIS 2011 , 18-20th April 2011, Guimaraes, Portugal
13. TECHNIK J. *Herringbone runner system balancing in injection mold by using numerical analysis*. In: In-Tech 2011, Bratislava, ISBN 978-80-904502-6-4
14. TECHNIK J. *Optimization of injection process by the help of numerical analysis to speeding of part placing to series manufacturing*. In: Technologia 2011, Bratislava, ISBN 978-80-227-3545-2

Užitné vzory

1. TECHNIK J., LENFELD P. *Geometrie vtoku pro materiály citlivé na smykové namáhání*. Užitný vzor, CZ 27475 U1. 2014-11-18.
Dostupné také z:
<http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0027/uv027475.pdf>

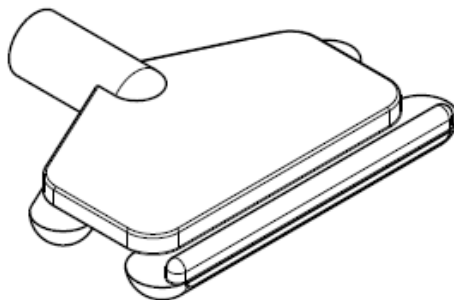
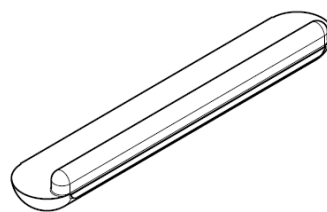
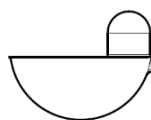
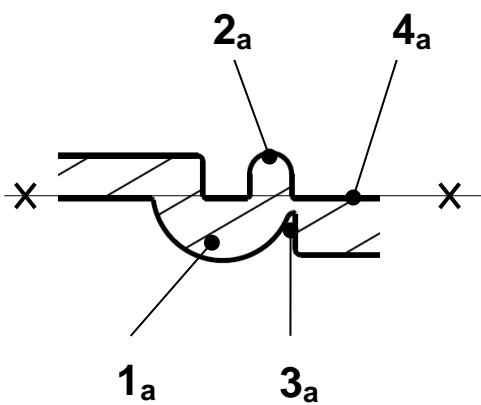
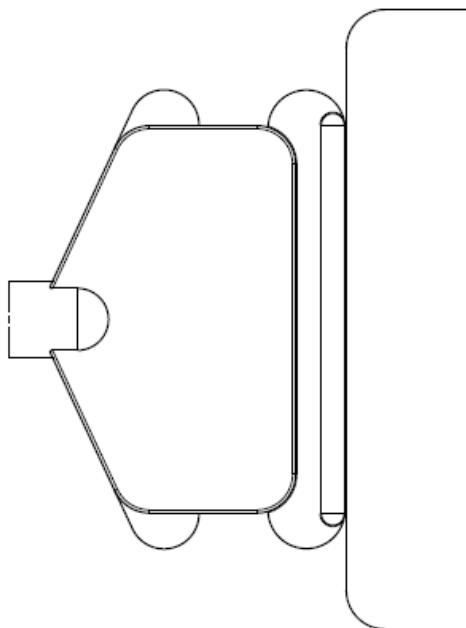
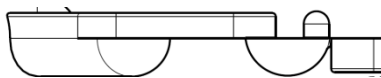


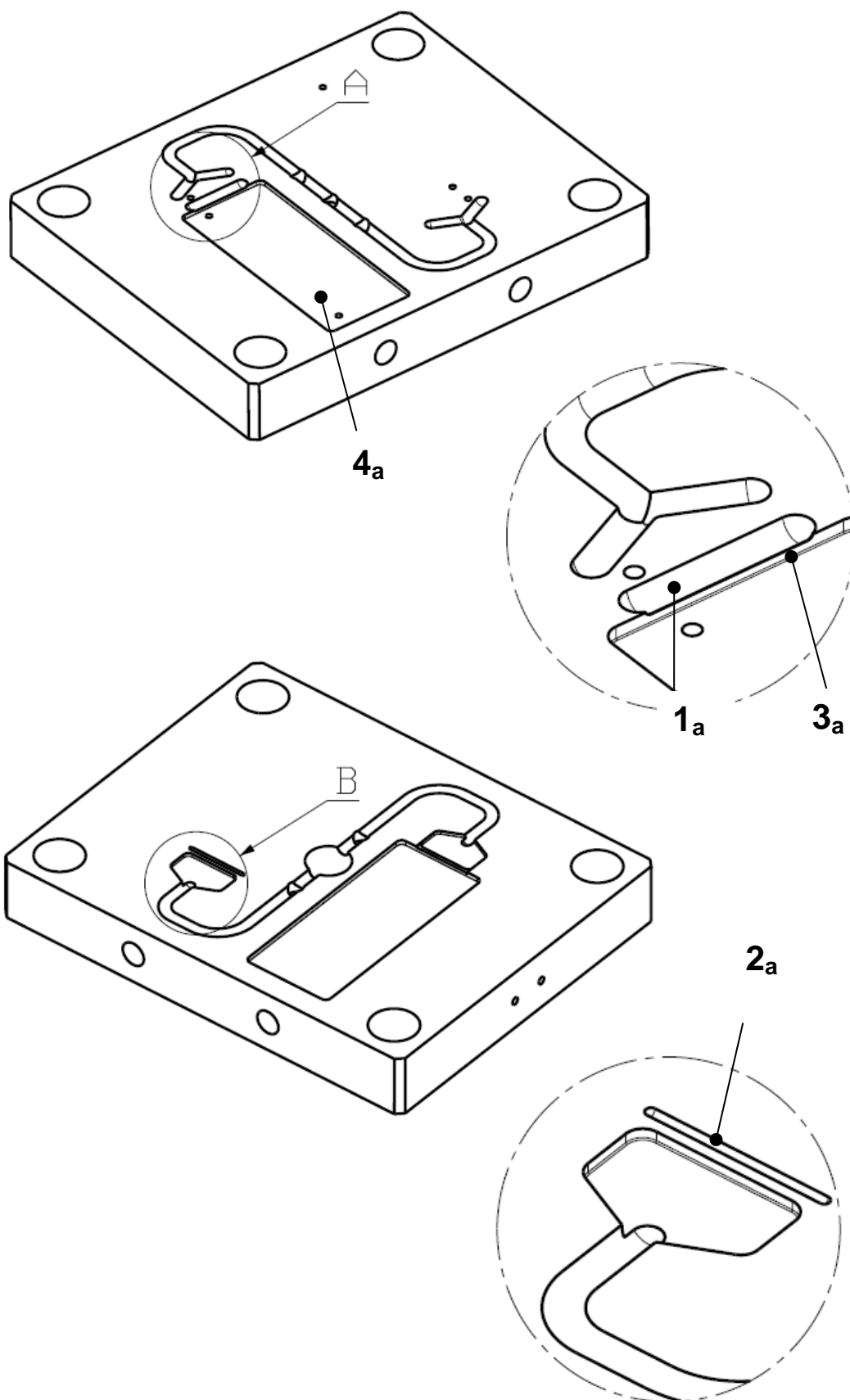
Seznam příloh

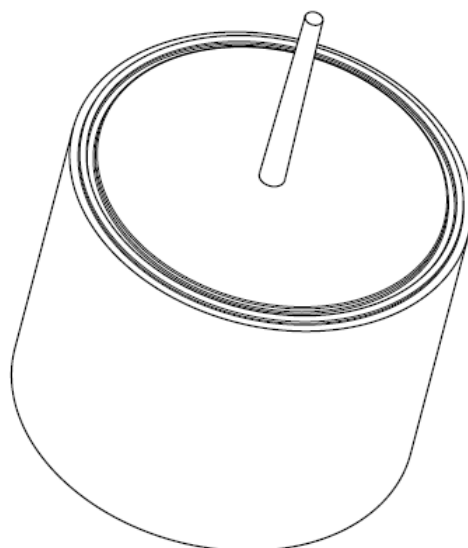
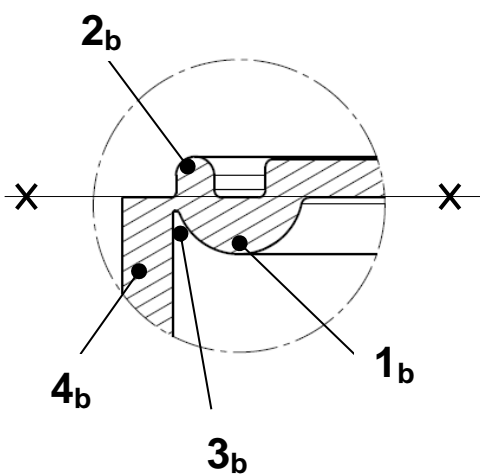
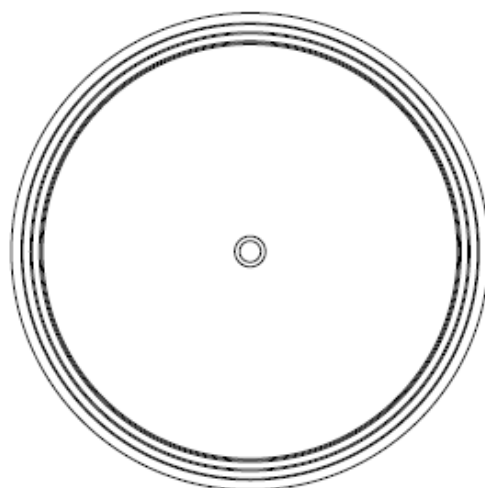
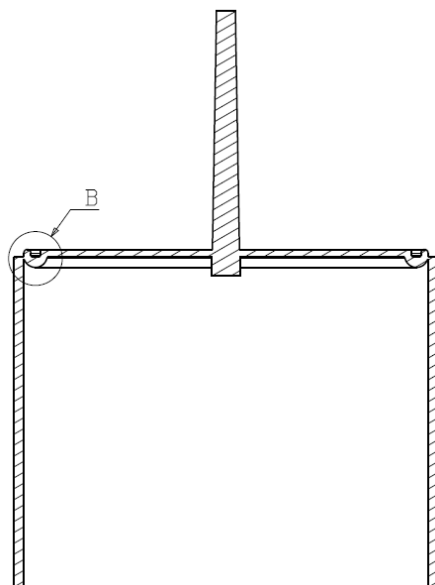
PŘÍLOHA A - VÝKRESY MODIFIKOVANÉ GEOMETRIE VTOKU	137
PŘÍLOHA B - VÝKRESY VSTŘIKOVACÍ FORMY	140



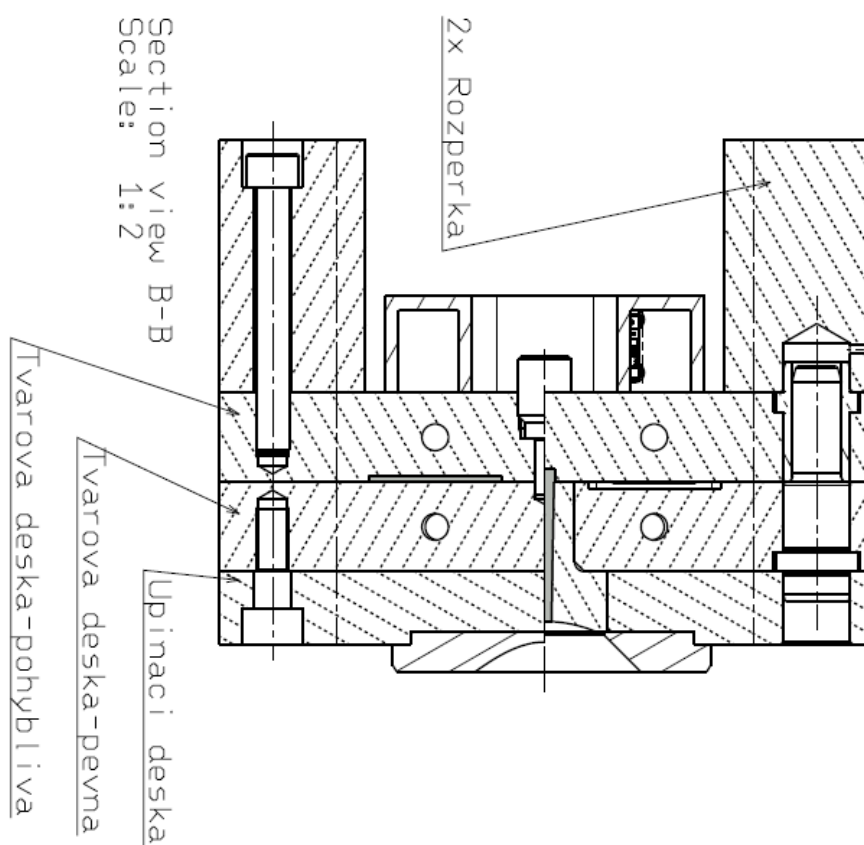
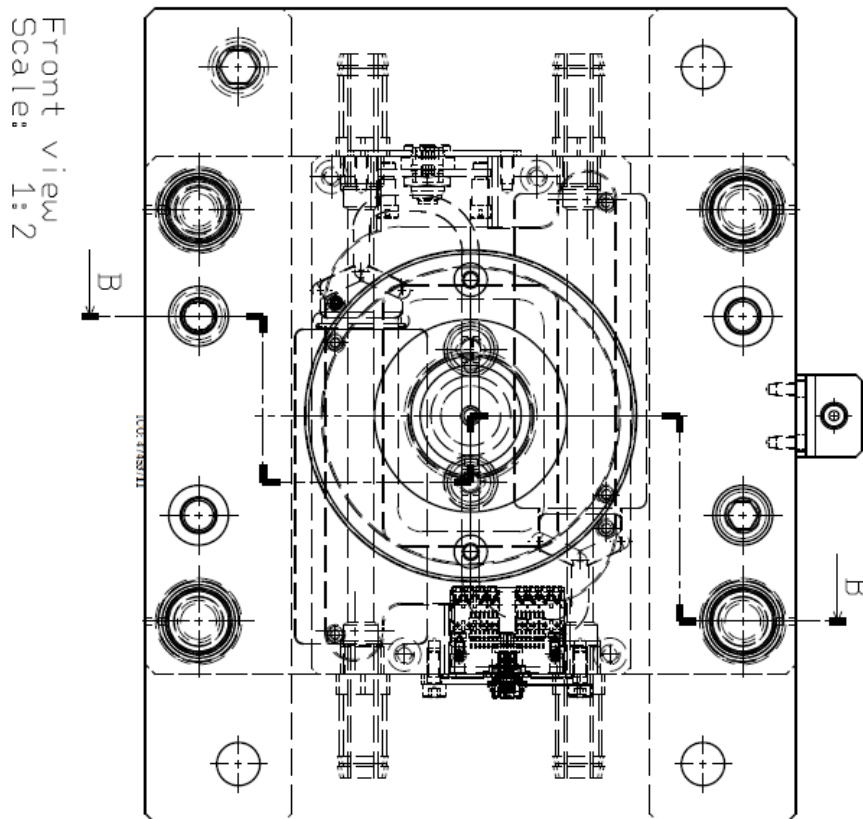
Příloha A - Výkresy modifikované geometrie vtoku

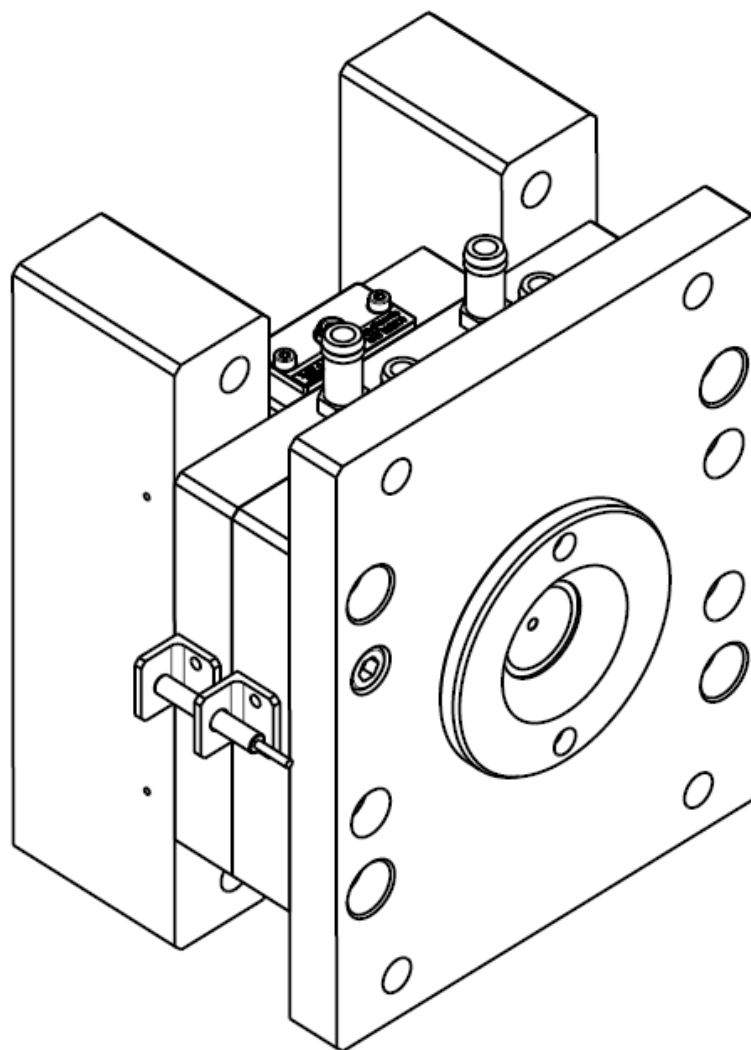


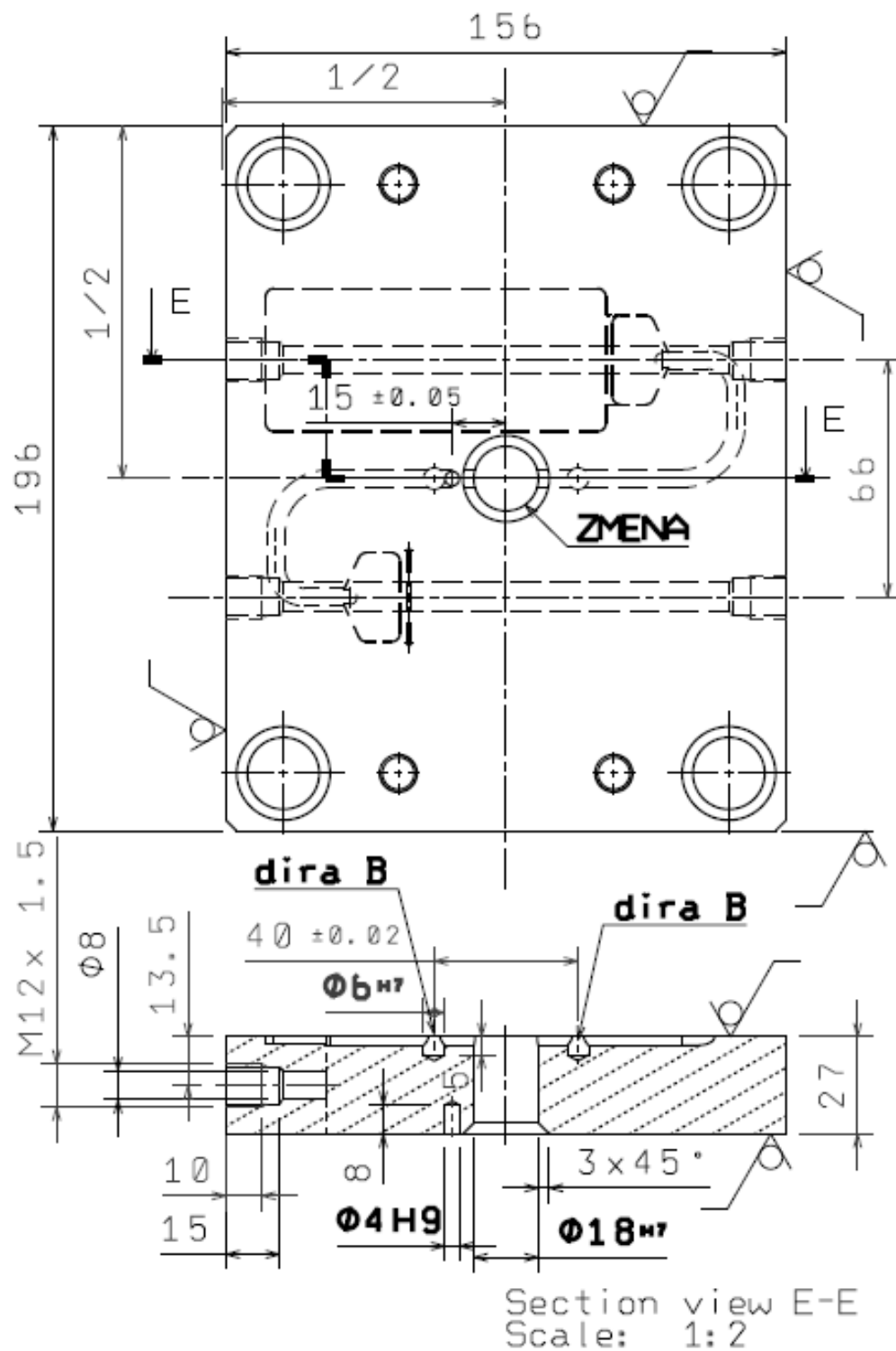


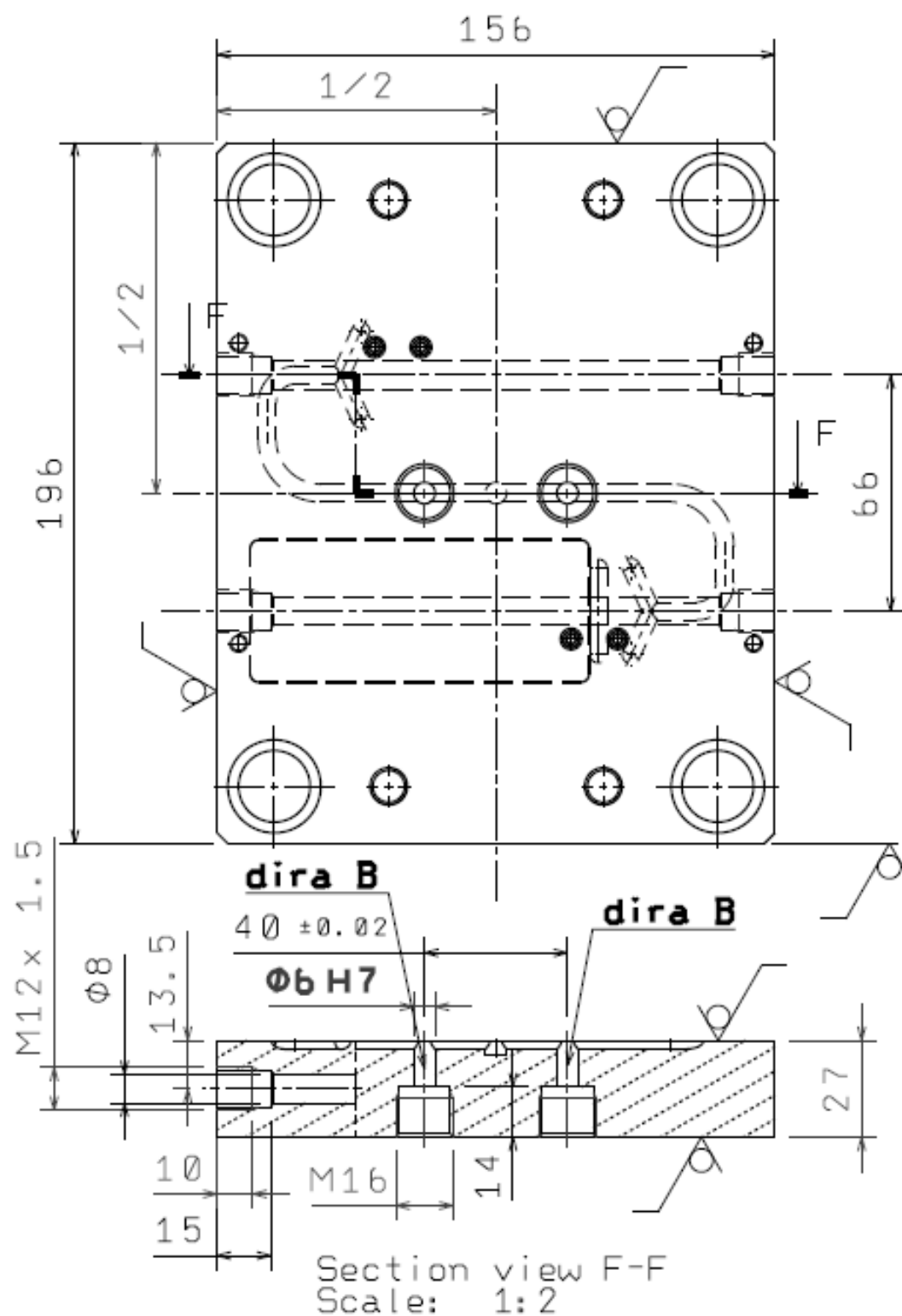


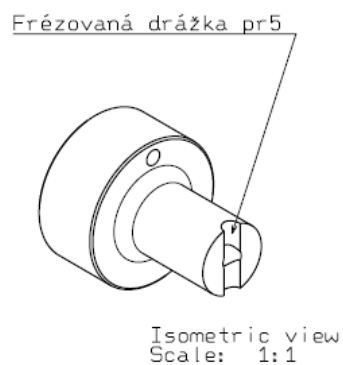
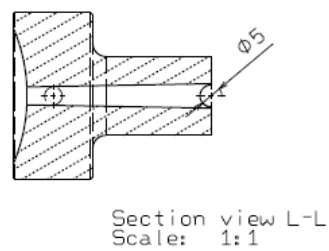
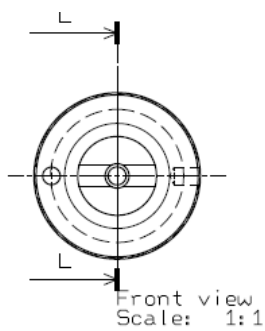
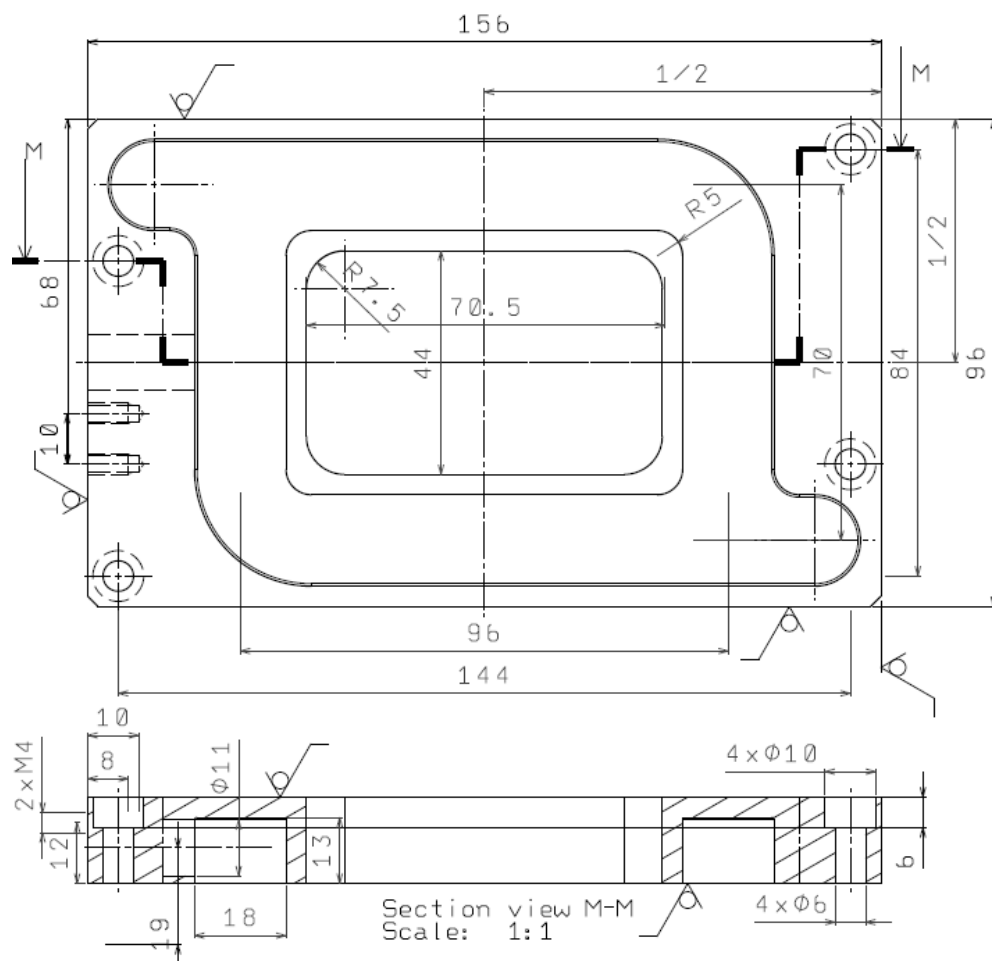
Příloha B - Výkresy vstřikovací formy











Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou dizertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé dizertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li dizertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Dizertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím dizertační práce a konzultantem.

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

V Liberci dne: 30.3.2015

Podpis: